

ФОРМИРОВАНИЕ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Схемы амплитудных модуляторов

1. Модулятор на полевом транзисторе
2. Модулятор на дифференциальном усилителе
3. Балансный модулятор

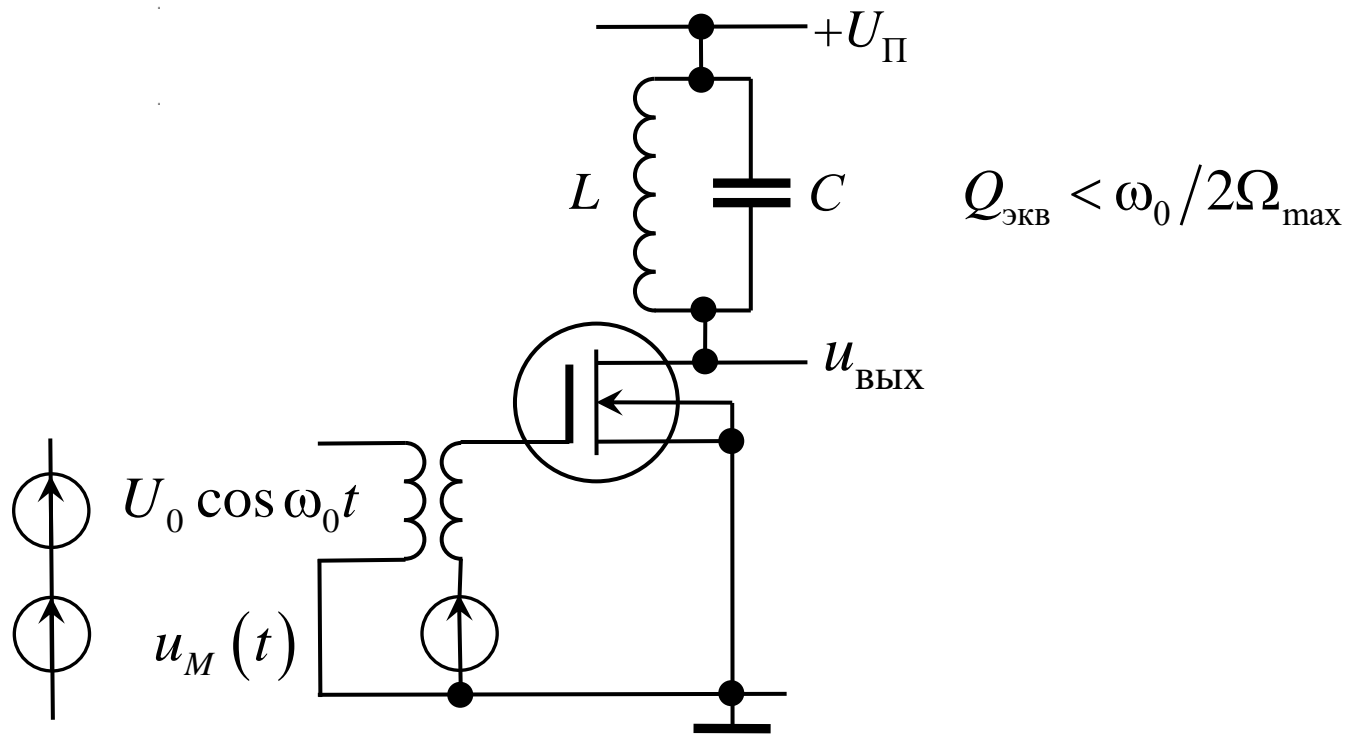
Модулятор на полевом транзисторе

Используется свойство вольт-амперной характеристики транзистора

$$i_c = bu_{зи}^2 + au_{зи} + i_{c0}$$

$$u_{зи} = u_M(t) + U_0 \cos \omega_0 t$$

$$i_c = \left[i_{c0} + au_M(t) + \frac{bU_0^2}{2} \right] + \left\{ aU_0 \cos \omega_0 t + 2bu_M(t)U_0 \cos \omega_0 t \right\} + \\ + \frac{bU_0^2}{2} \cos 2\omega_0 t.$$



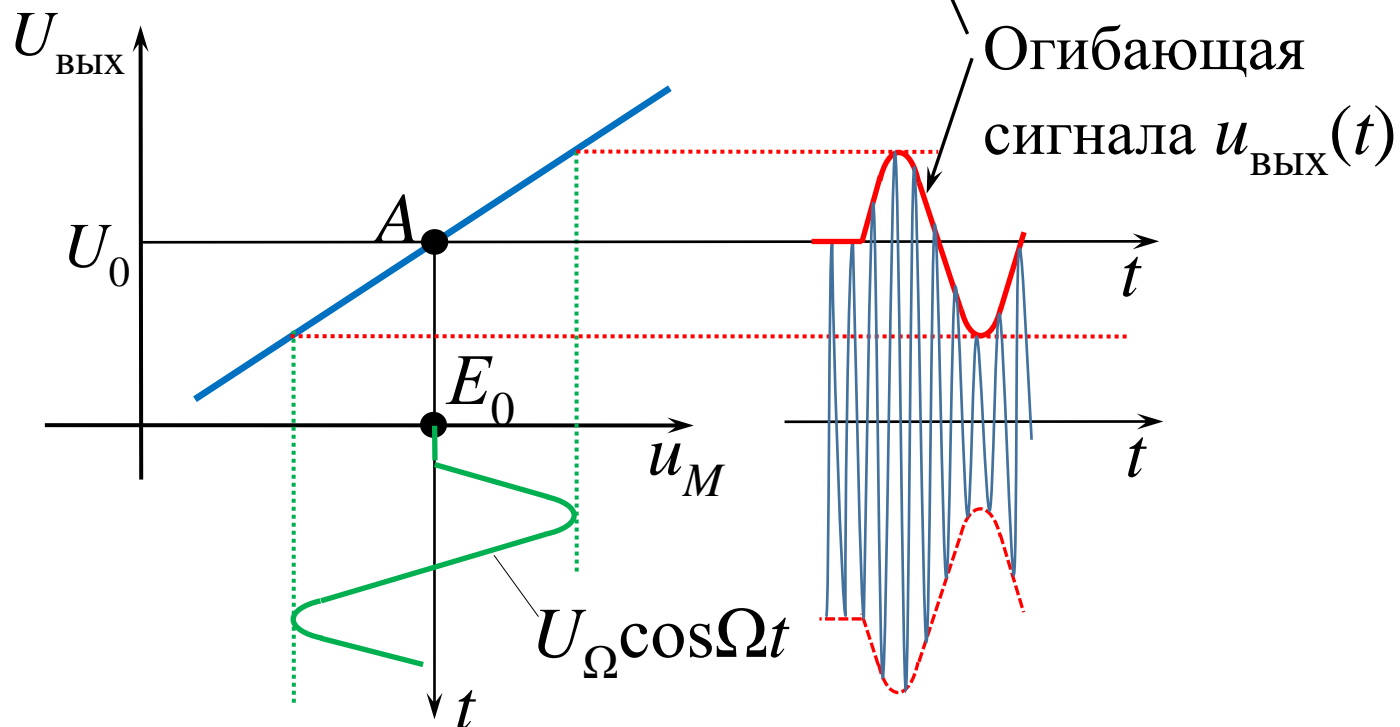
$$\begin{aligned}
 u_{\text{СИ}}(t) &= -i_{\text{c}}(t) \cdot R_{\text{ЭКБ}} = -\left(aU_0 \cos \omega_0 t + 2bu_M(t)U_0 \cos \omega_0 t\right) \cdot R_{\text{ЭКБ}} = \\
 &= -\left\{aU_0 \left[1 + \frac{2b}{a}u_M(t)\right] \cos \omega_0 t\right\} \cdot R_{\text{ЭКБ}}
 \end{aligned}$$

Модулятор на усилителе с управляемым коэффициентом усиления

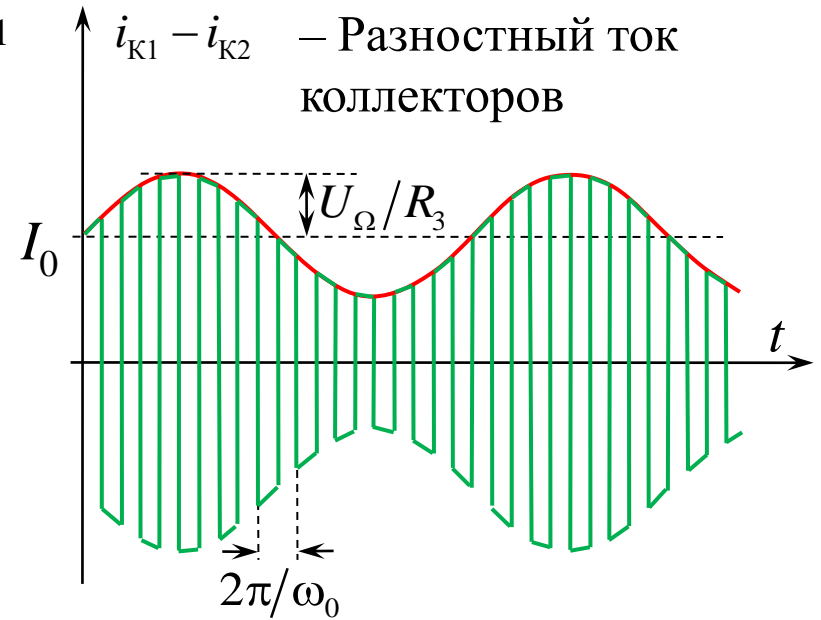
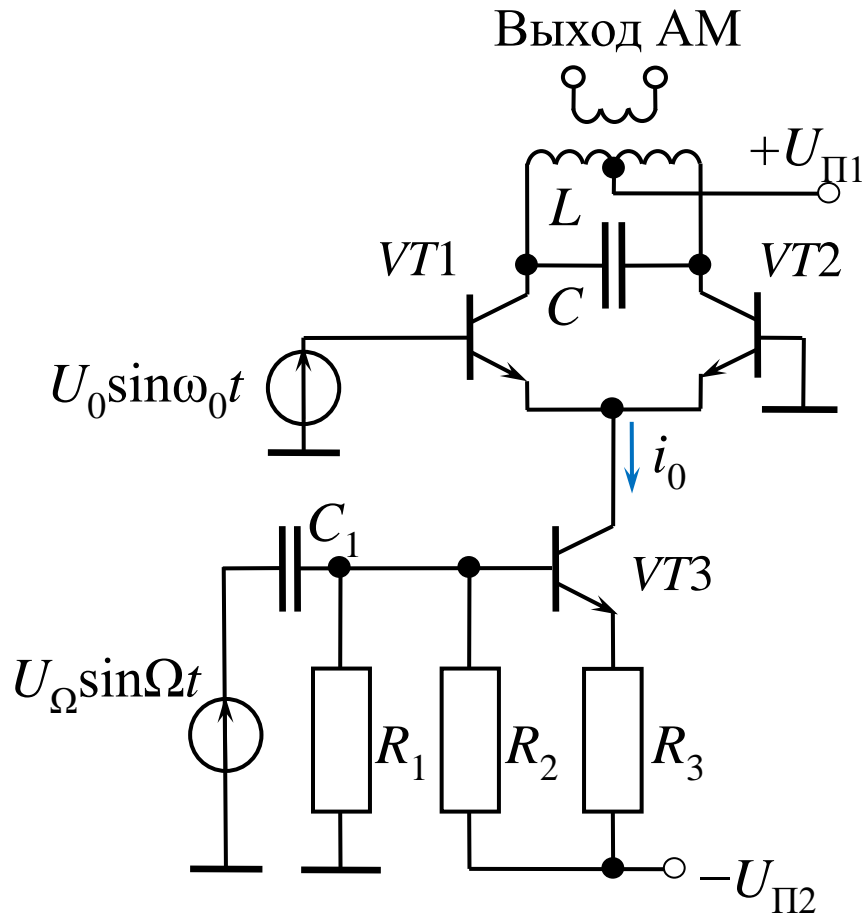
Если $K = K_0 \cdot u_{\text{упр}}$, то $u_{\text{вых}}(t) = K_0 \cdot u_{\text{упр}}(t) \cdot U_0 \sin \omega_0 t$

$$u_{\text{упр}}(t) = u_M(t) = E_0 + U_{\Omega} \sin \Omega t$$

$$\begin{aligned} u_{\text{вых}}(t) &= K_0 (E_0 + U_{\Omega} \sin \Omega t) \cdot U_0 \sin \omega_0 t = U_{\text{вых}}(t) \cdot \sin \omega_0 t = \\ &= K_0 E_0 U_0 \left(1 + \frac{U_{\Omega}}{E_0} \sin \Omega t \right) \cdot \sin \omega_0 t \end{aligned}$$



Модулятор на дифференциальном усилителе



$$U_0 > 4U_T$$

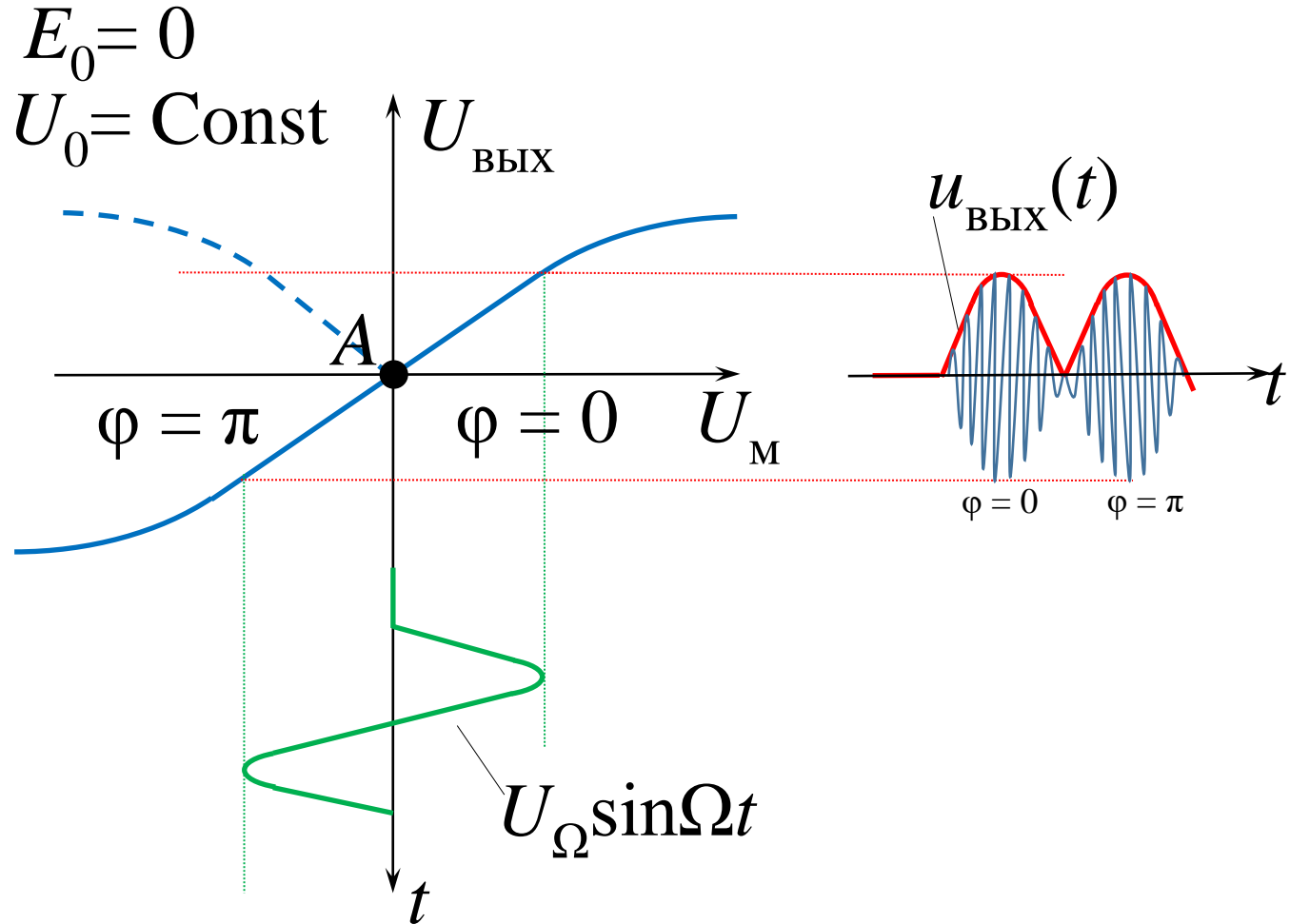
$$K_{\text{диф}} = SR_{\text{экв}} = \frac{I_\Theta R_{\text{экв}}}{U_T}$$

$$i_0 = I_0 + \frac{U_\Omega}{R_3 + r_3} \sin \Omega t, \quad R_3 \square r_3$$

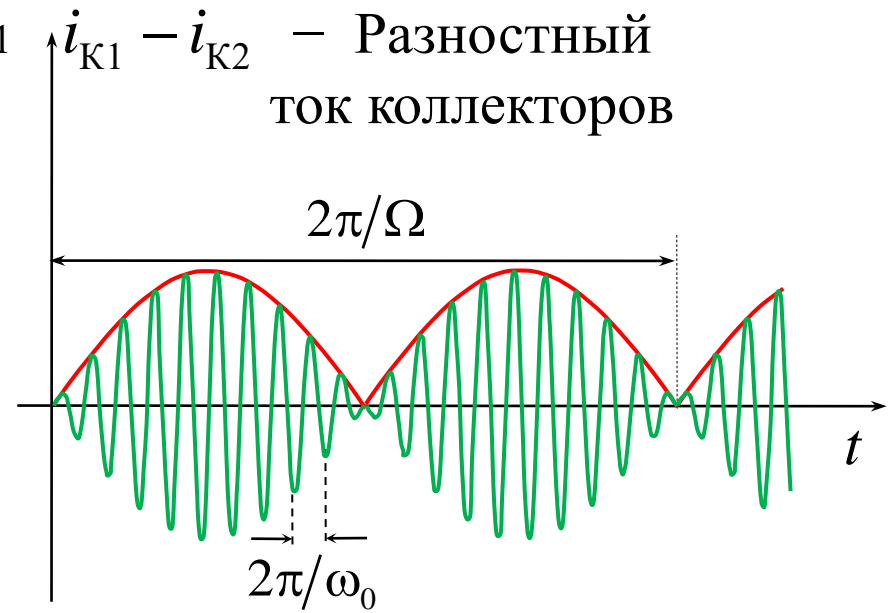
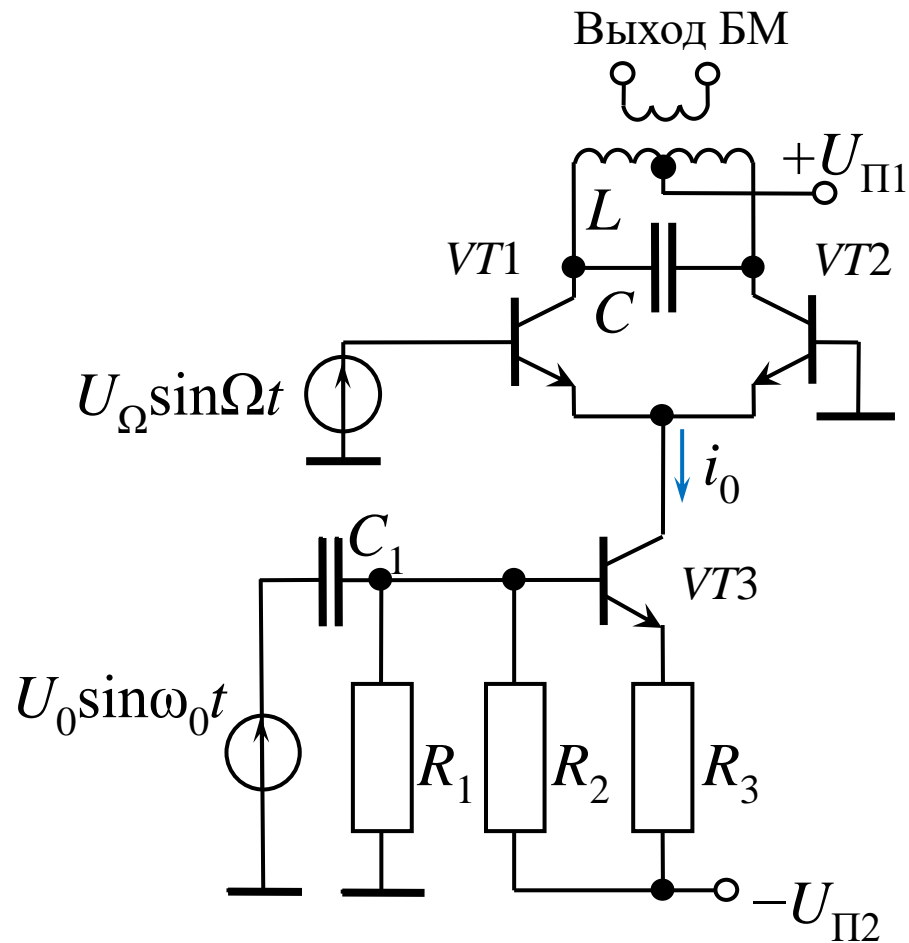
$$u_K = I_{K1} R_{\text{экв}} \sin \omega_0 t \quad \Delta u_K = \frac{4}{\pi} I_0 R_{\text{экв}} \left(1 + \frac{U_\Omega}{I_0 R_3} \sin \Omega t \right) \sin \omega_0 t$$

Балансный модулятор

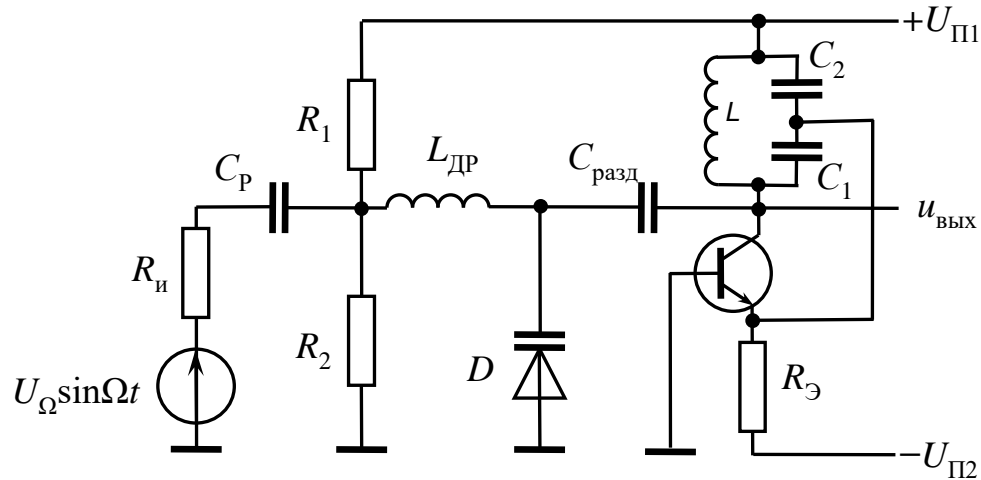
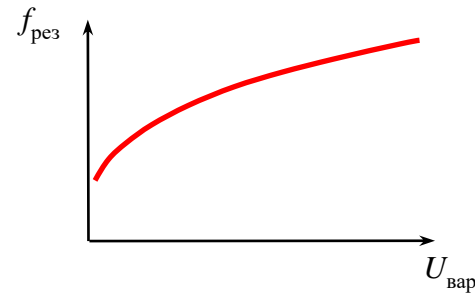
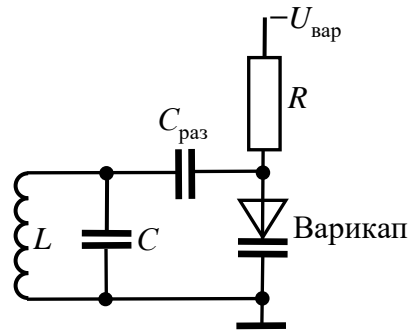
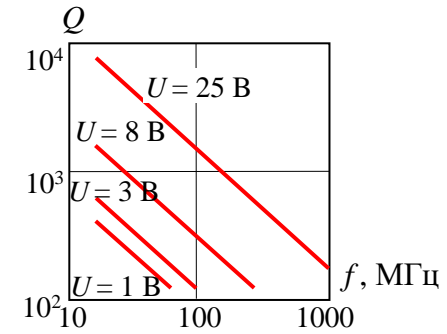
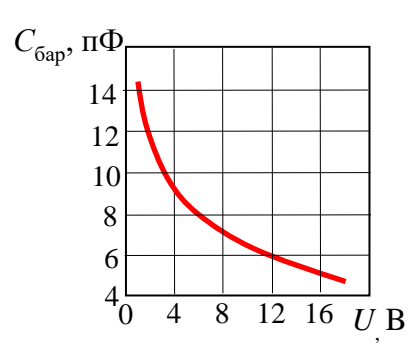
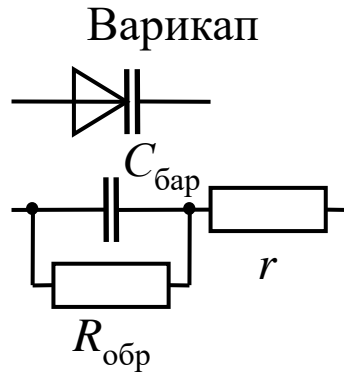
$$u(t) = \alpha U_0 U_\Omega \sin \Omega t \sin \omega_0 t$$



Балансный модулятор

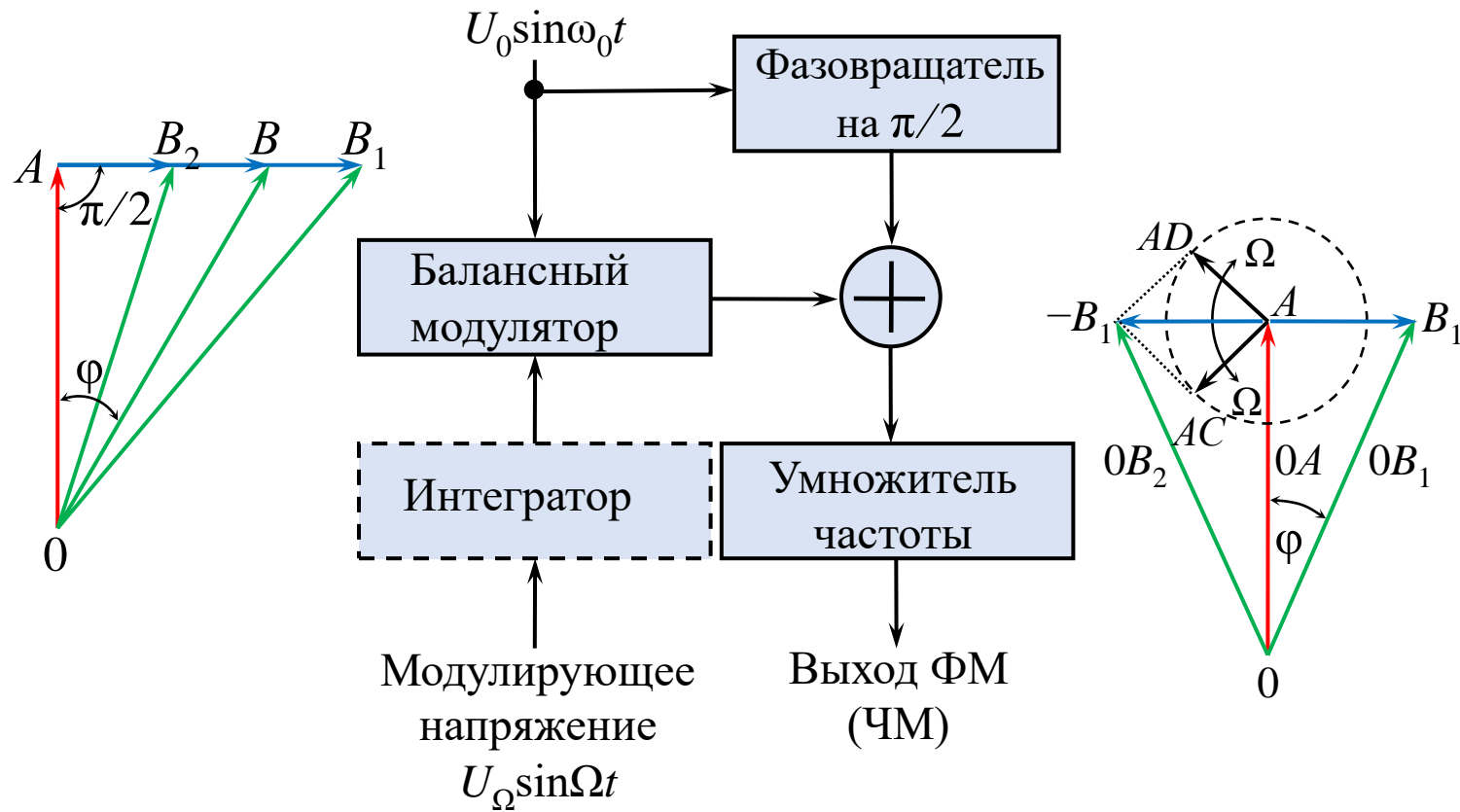


Частотный модулятор

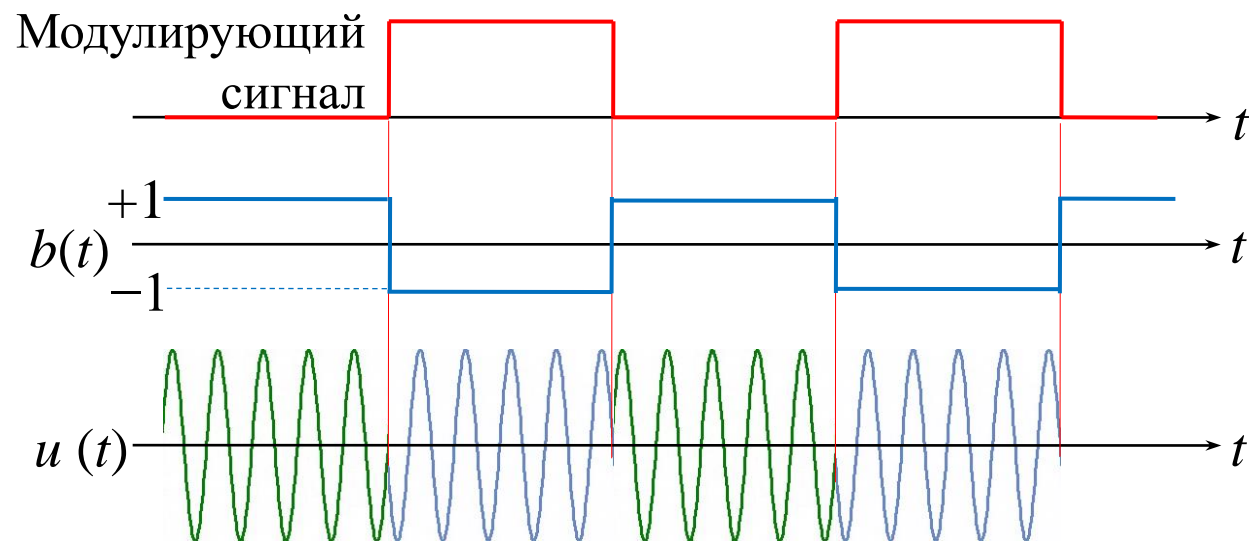
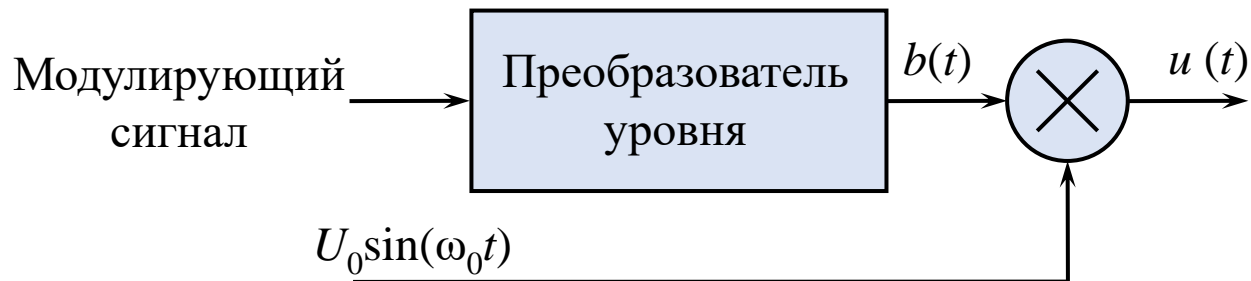


ФМ-модулятор Армстронга

В 1932 г. Эдвин Говард Армстронг предложил эффективный метод получения радиосигналов с угловой модуляцией и в 1934 г. получил патент.



Формирование ФМн-сигналов

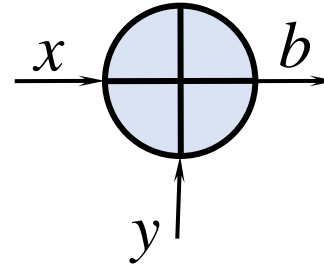
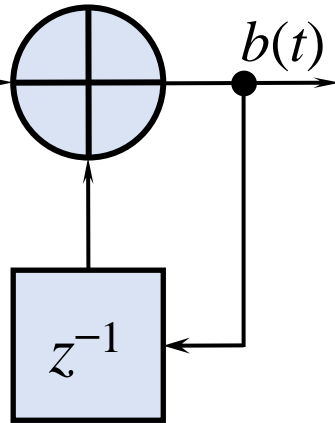


Модулятор ОФМн-2

Сумматор по модулю 2

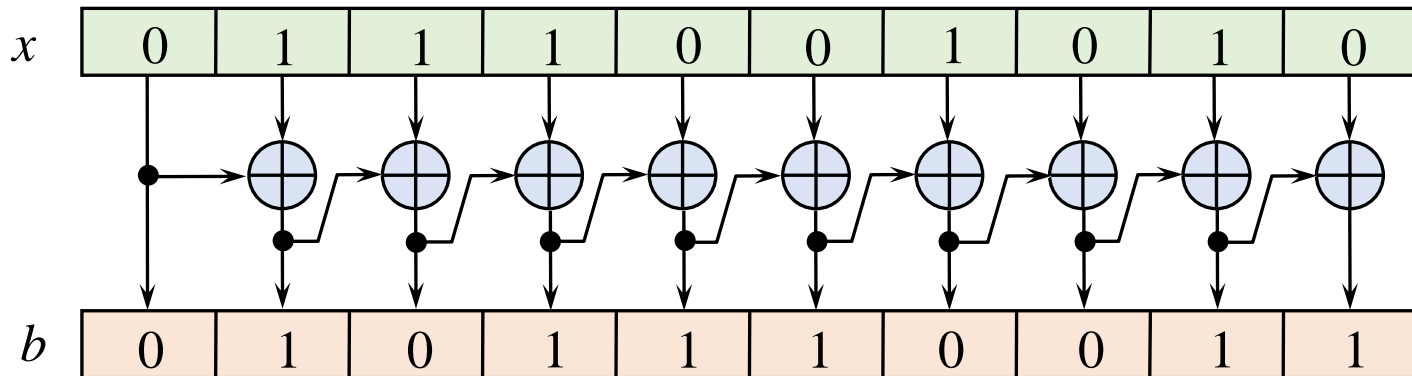
Модулирующий
сигнал

Задержка на
длительность
1 символа

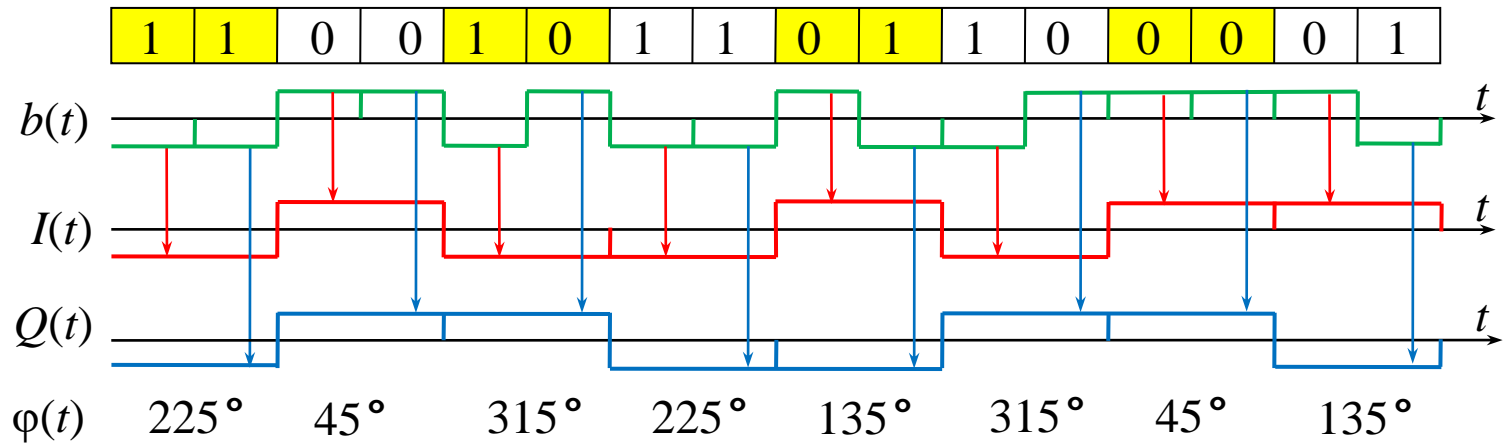


x	y	b
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0

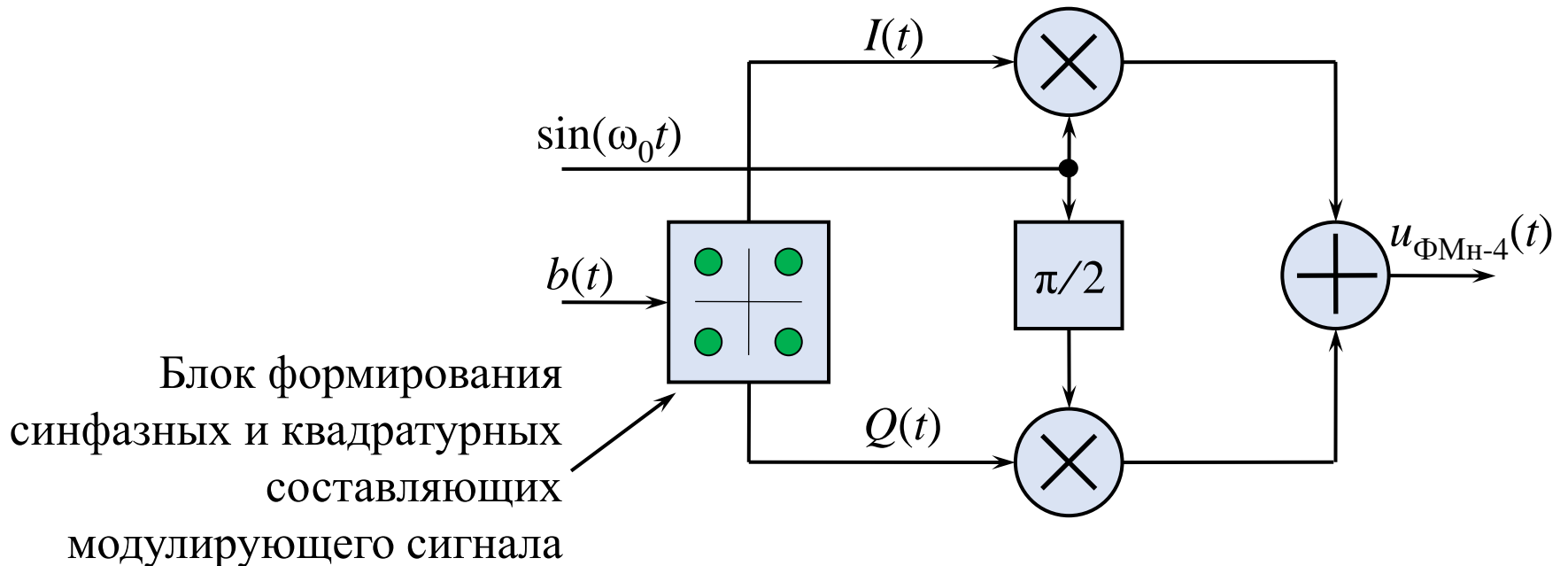
Дифференциальный кодер



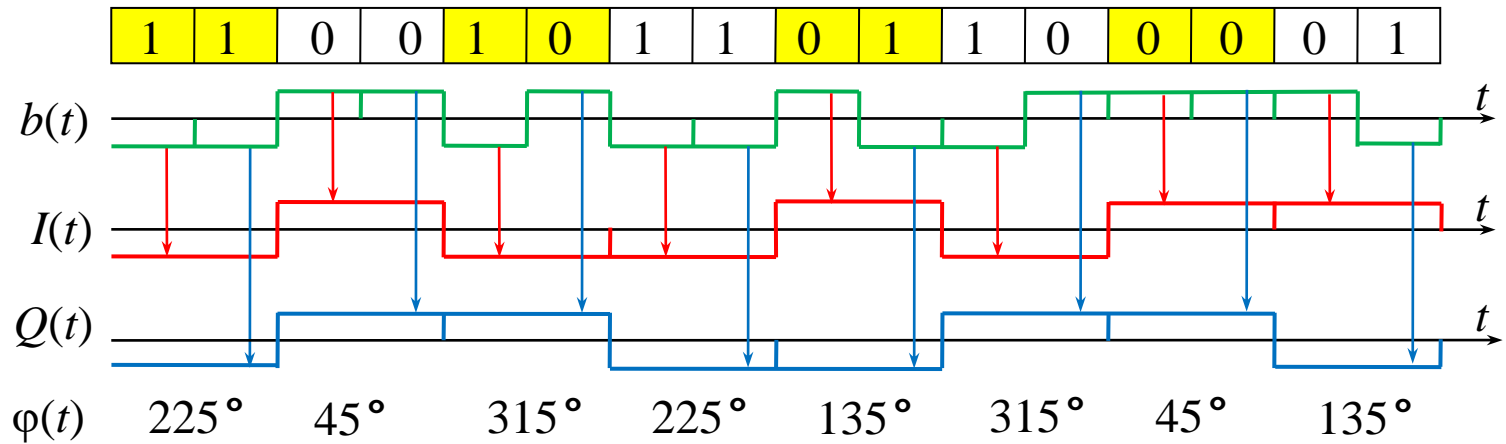
Формирование сигналов ФМН-4



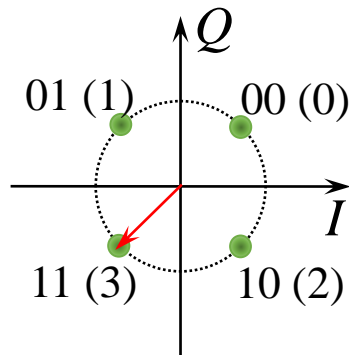
$$u_{\text{ФМН-4}}(t) = I(t) \cdot \sin(\omega_0 t) + Q(t) \cos(\omega_0 t) \quad \varphi(t) = \arctg(Q/I).$$



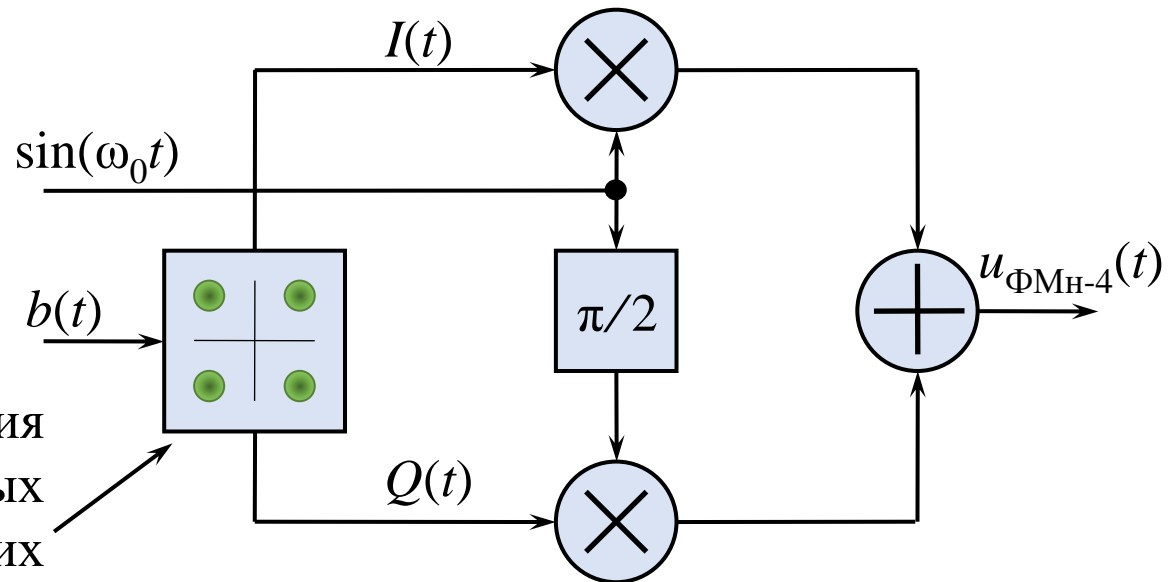
Формирование сигналов ФМН-4



$$u_{\text{ФМН-4}}(t) = I(t) \cdot \sin(\omega_0 t) + Q(t) \cos(\omega_0 t) \quad \varphi(t) = \arctg(Q/I).$$

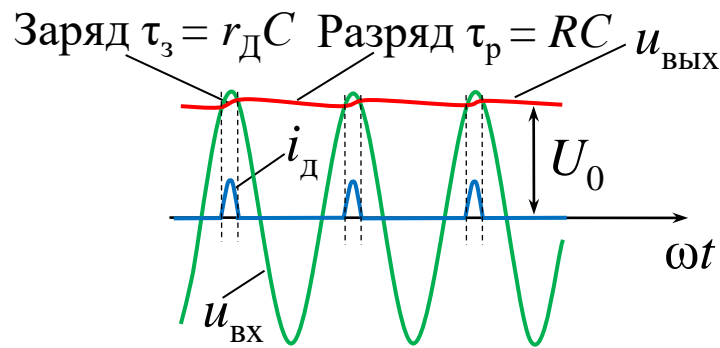
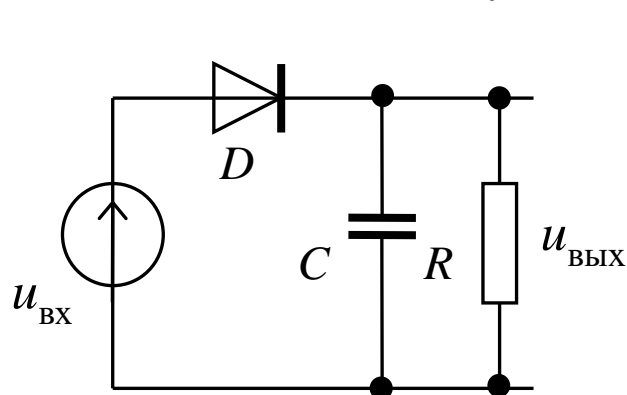


Блок формирования
синфазных и квадратурных
составляющих
модулирующего сигнала

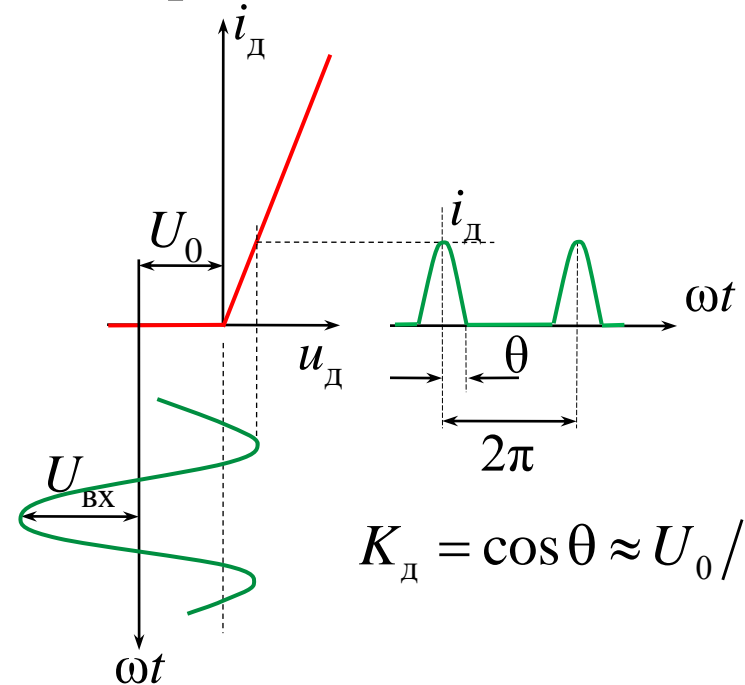


ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

Амплитудное детектирование



$$i_D = \begin{cases} S(U_{ВХ} \cos \omega t - U_0) & \text{при } u_D > 0, \\ 0 & \text{при } u_D \leq 0. \end{cases}$$



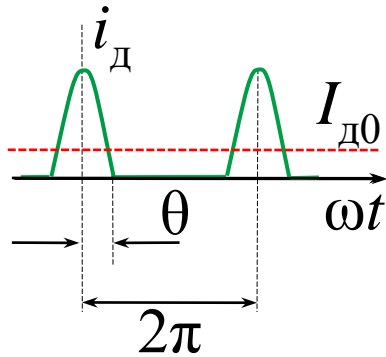
$$K_D = \cos \theta \approx U_0 / U_{ВХ}$$



Параметры диодного детектора

Коэффициент передачи детектора

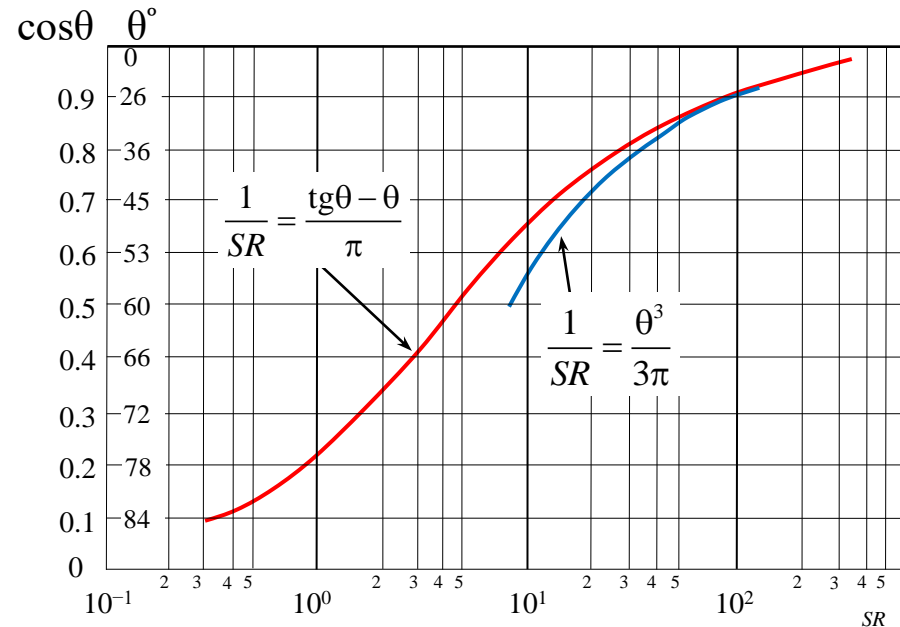
$$K_{\text{д}} = \cos \theta = U_0 / U_{\text{BX}} = I_{\text{д0}} R / U_{\text{BX}}$$

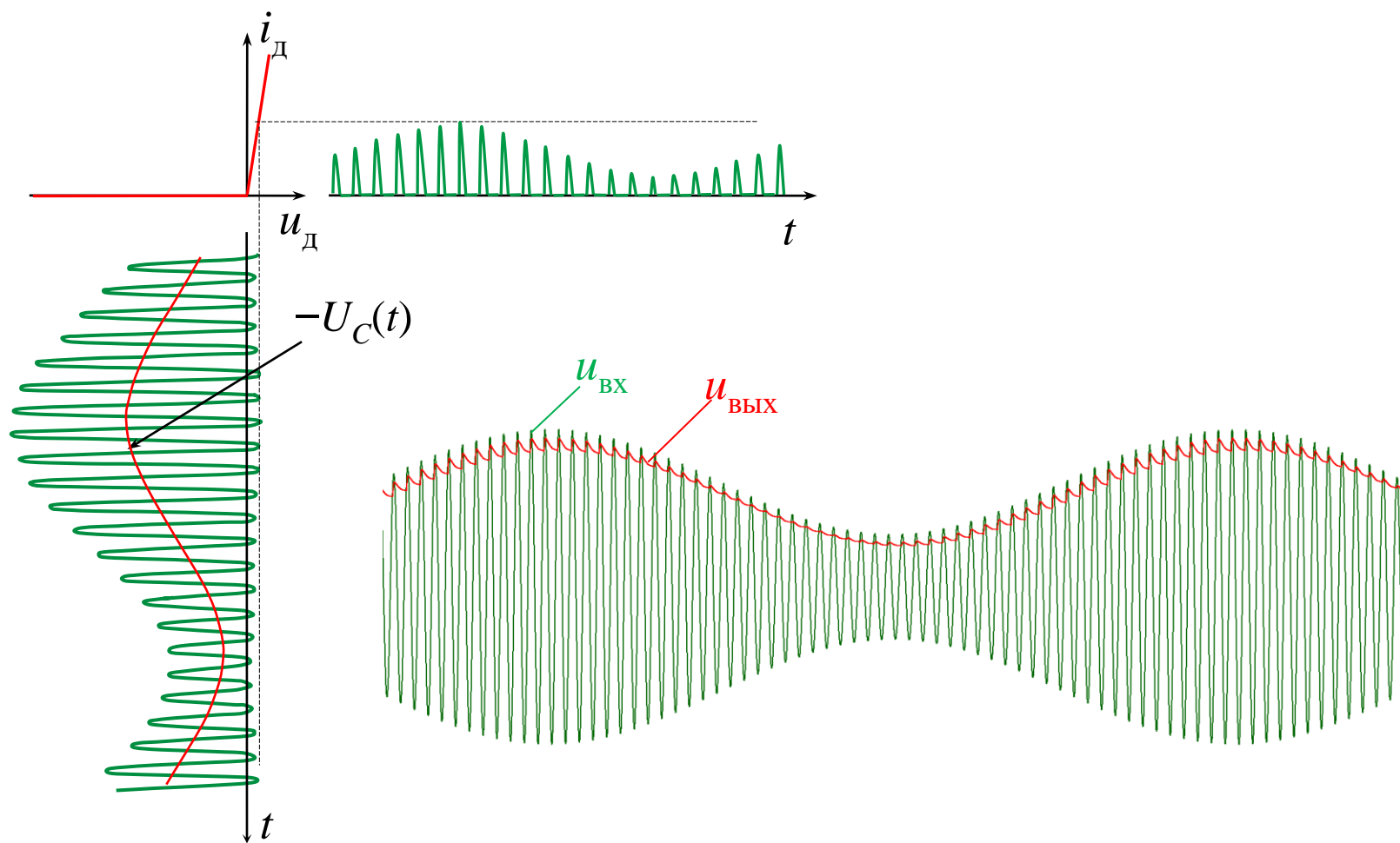


$$\begin{aligned} I_{\text{д0}} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\theta} i_{\text{д}}(t) d(\omega t) = \frac{S}{\pi} \int_0^{\theta} (U_{\text{BX}} \cos \omega t - U_0) d(\omega t) = \\ &= \frac{S}{\pi} (U_{\text{BX}} \sin \theta - U_0 \theta) = \frac{S U_{\text{BX}}}{\pi} (\sin \theta - \theta \cos \theta) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{SR} = \frac{\text{tg} \theta - \theta}{\pi}$$

$$\frac{1}{SR} \approx \frac{\theta^3}{3\pi}$$





Входное сопротивление детектора

$$R_{\text{BX}} = U_{\text{BX}} / I_{\text{д1}}$$

$$I_{\text{д1}} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\theta} i_{\text{д}}(t) \cos(\omega t) d(\omega t) = S U_{\text{BX}} \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{\pi}$$

$$R_{\text{BX}} = \pi / [S (\theta - \sin \theta \cdot \cos \theta)]$$

Если $\theta = \pi/2$, то $R_{\text{BX}} = 2/S = 2r_{\text{д}}$

При $\theta \rightarrow 0$ ($SR \rightarrow \infty$) $R_{\text{BX}} \approx \frac{1}{S} \cdot \frac{3\pi}{2\theta^3}$

$$\frac{1}{SR} \approx \frac{\theta^3}{3\pi} \quad R_{\text{BX}} \approx R/2$$

Выбор параметров детектора

1. Сопротивление резистора R выбирается из условия допустимой нагрузки источника сигнала.
2. $C \ll 1/\omega R$.

Условие безинерционности детектора

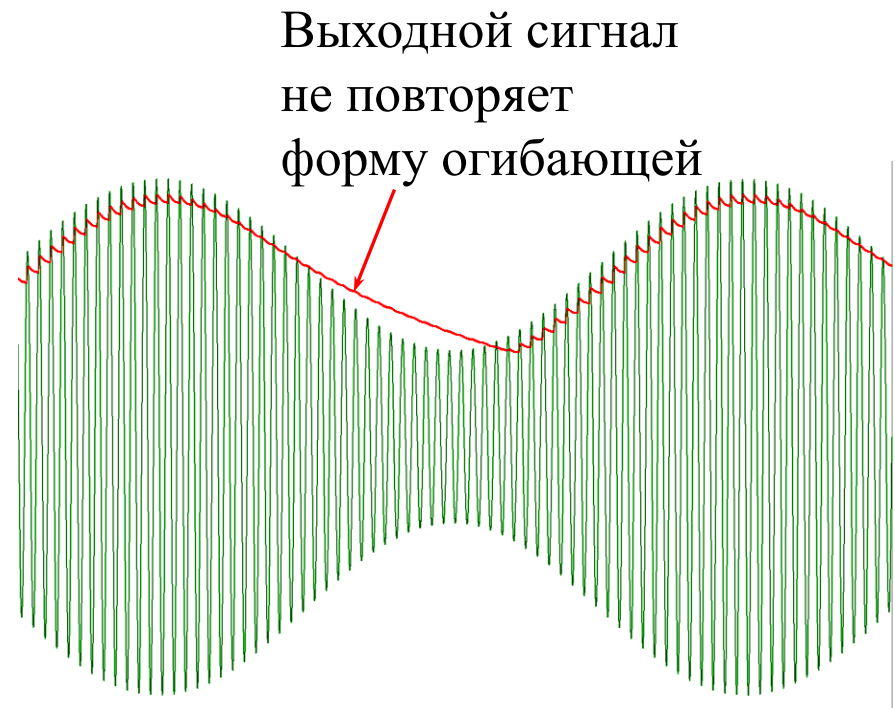
$$\left| dU_{\text{огibaющей}} / dt \right| < \left| dU_{\text{вых}} / dt \right|$$

$$\left| dU_{\text{огibaющей}} / dt \right| = m\Omega \sin \Omega t$$

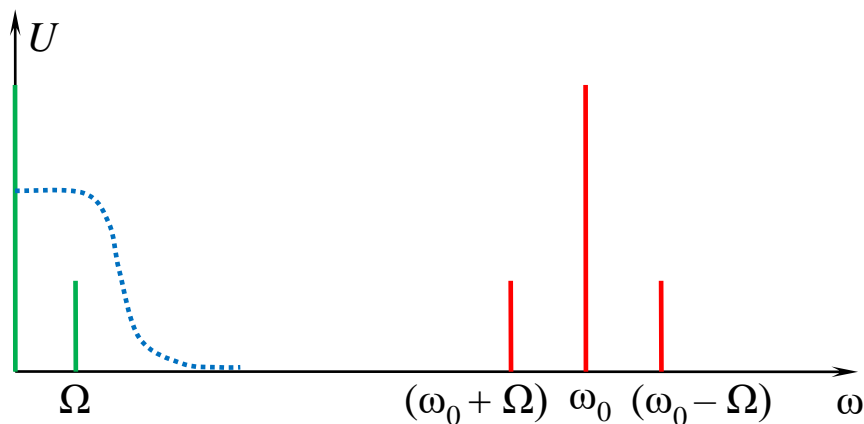
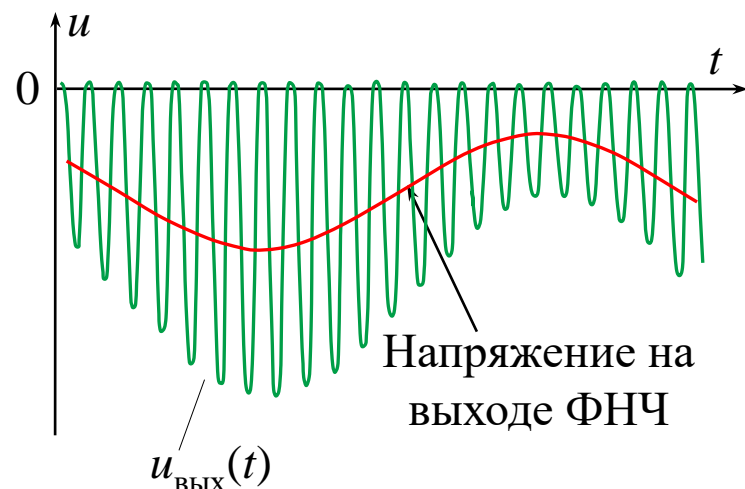
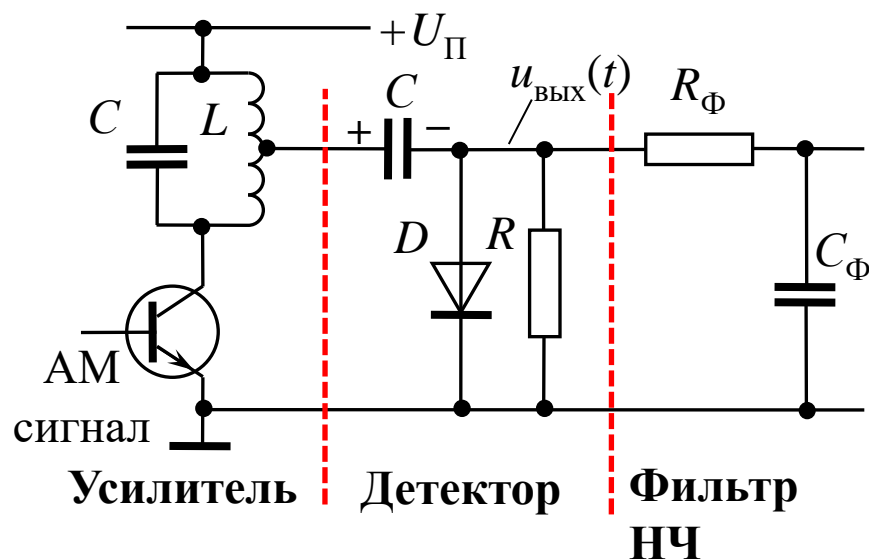
$$\left| dU_{\text{вых}} / dt \right| = (1 + m \cos \Omega t) / RC$$

При $\cos \Omega t = -m$ максимум отношения производных

$$\Omega RC < \sqrt{1 - m^2} / m$$

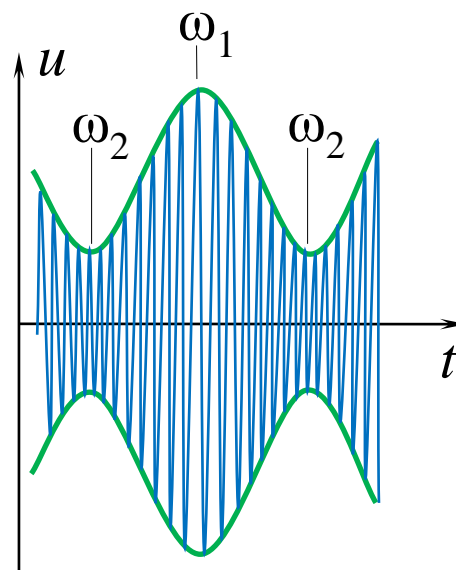
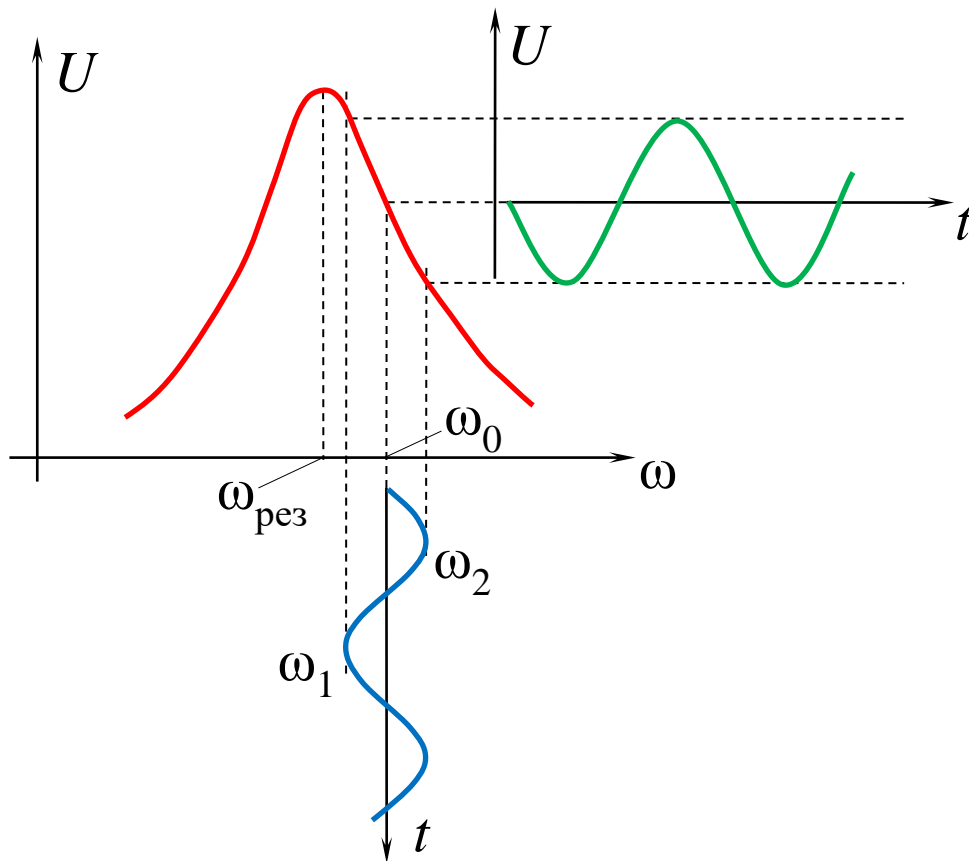


Параллельный диодный детектор

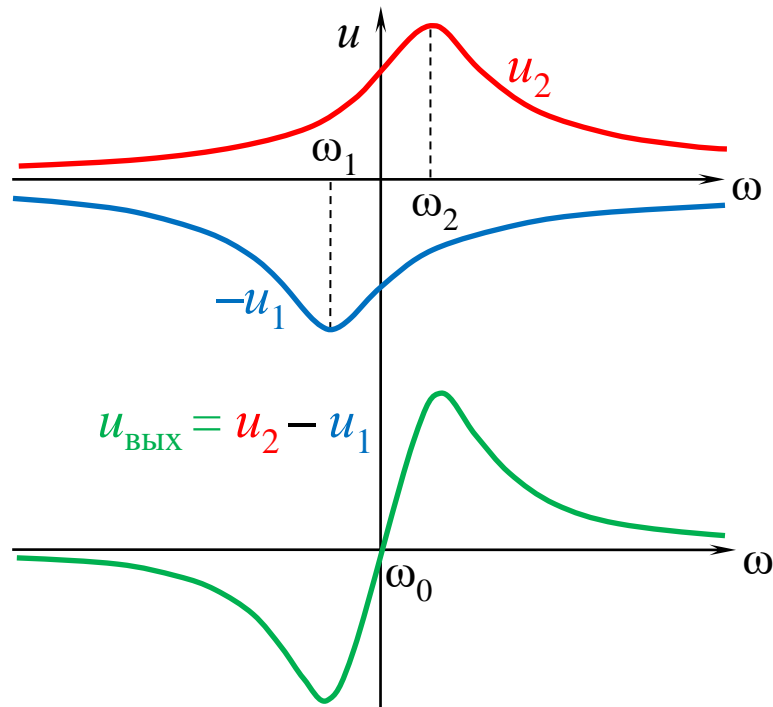
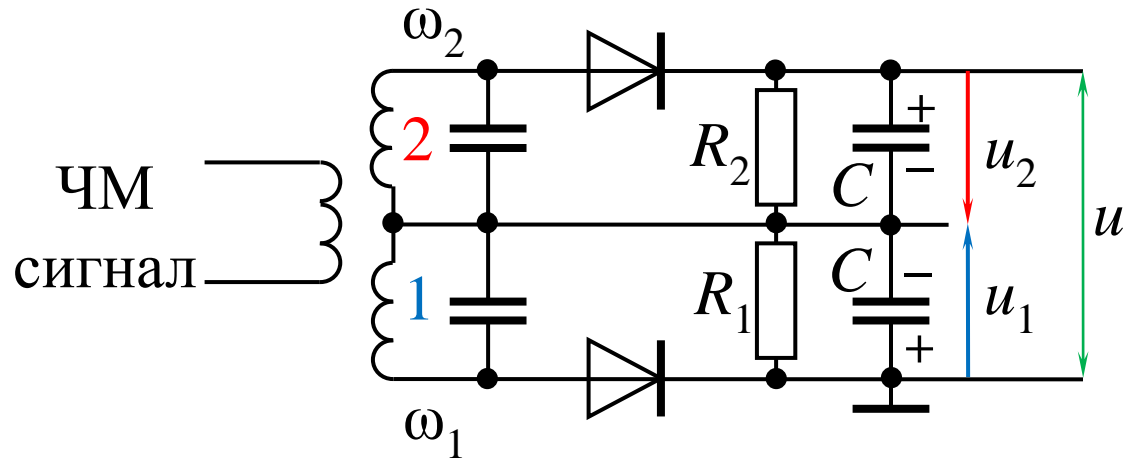


$$R_{\text{вх(парал)}} \approx \frac{R}{3}$$

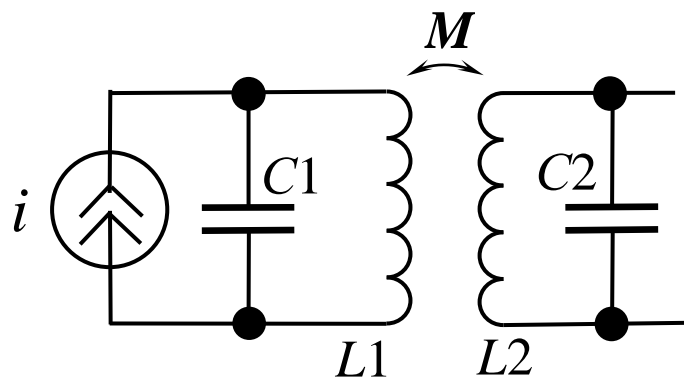
Детектирование частотно-модулированных сигналов



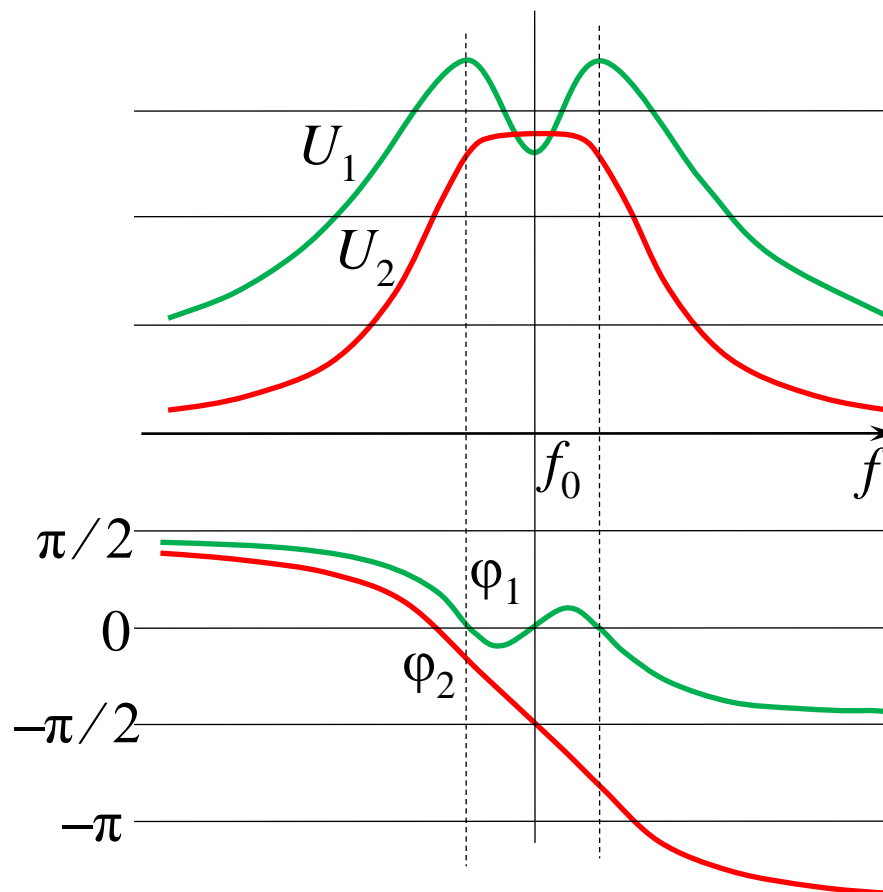
Частотный детектор с двумя расстроенными контурами



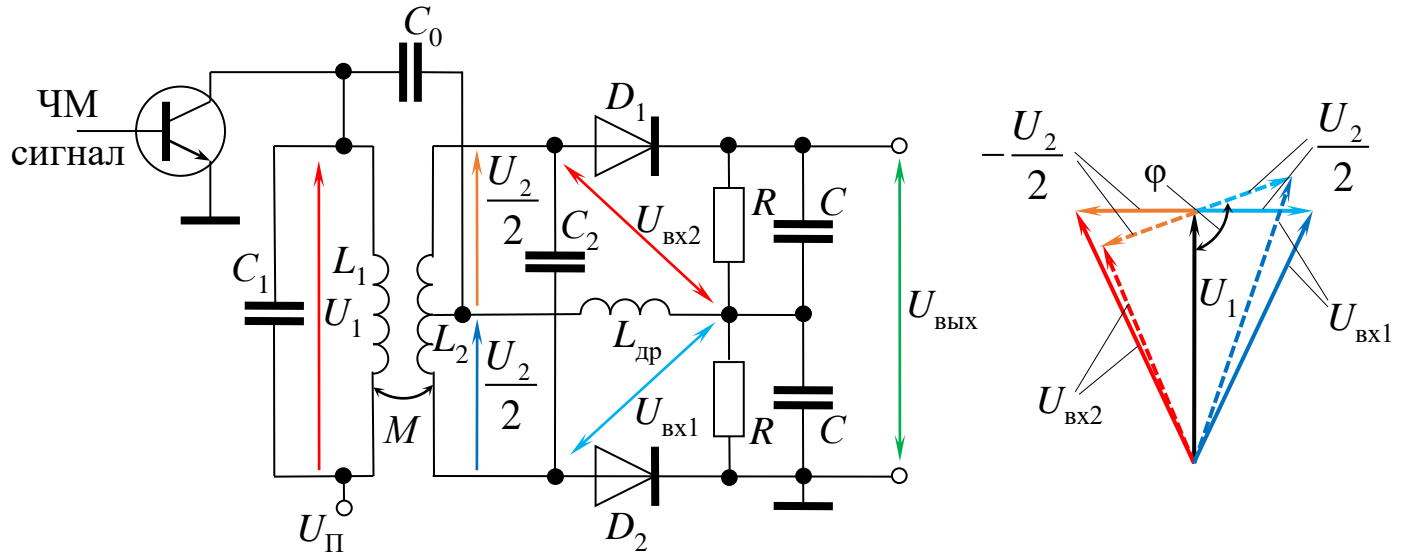
Свойства связанных контуров



$$\frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \omega_0$$



Фазочастотный дискриминатор

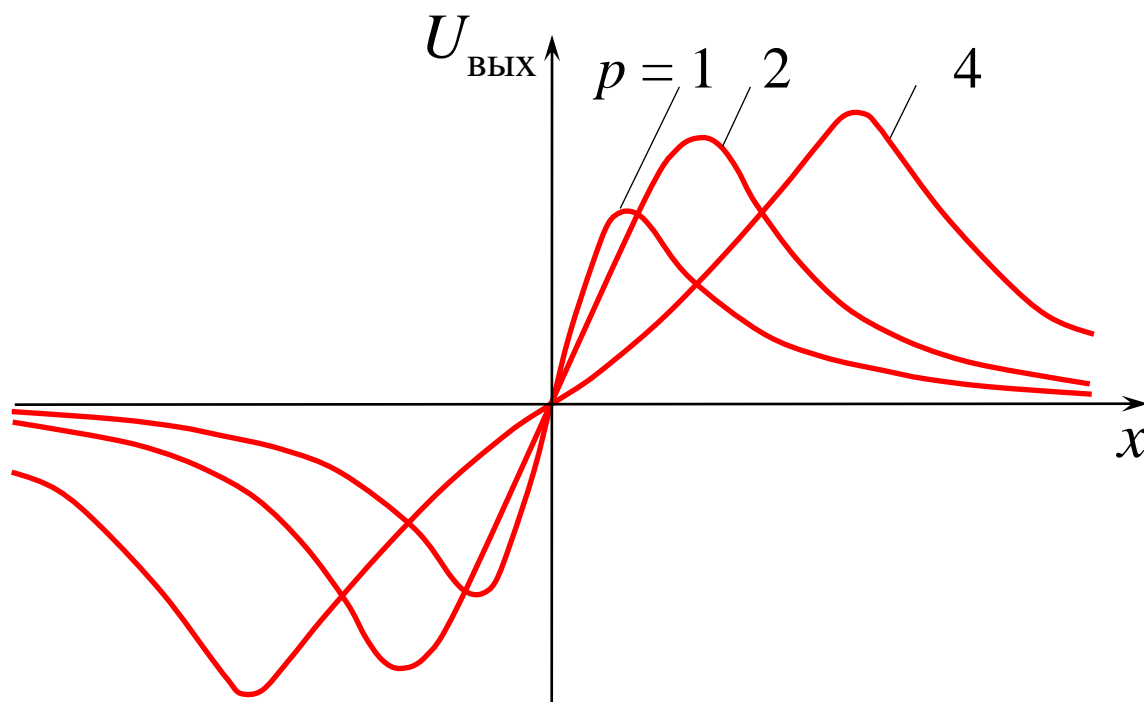


$$U_{\text{ВЫХ}} = |U_{\text{ВХ1}}| - |U_{\text{ВХ2}}|$$

$$p = kQ \quad k = M / \sqrt{L_1 L_2} \quad h = p \sqrt{L_2 / L_1} = MQ / L_2 \quad x = 2Q \cdot (\Delta\omega / \omega_0)$$

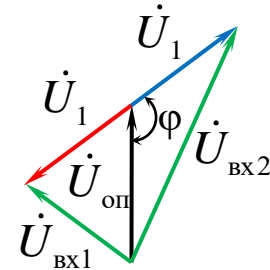
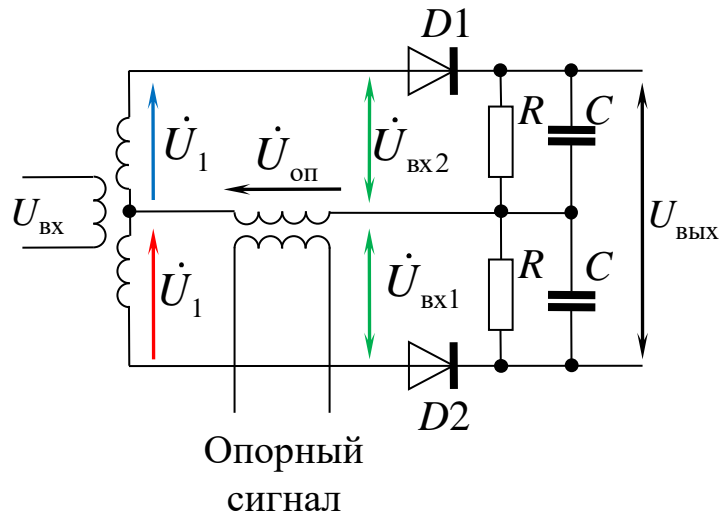
$$U_{\text{ВЫХ}} = k_d U_0 \frac{\sqrt{1 + (x + h/2)^2} - \sqrt{1 + (x - h/2)^2}}{\sqrt{(1 + p^2 - x^2)^2 + 4x^2}}$$

$$\text{при } L_1 = L_2 \quad h = p$$



Характеристики частотного дискриминатора

Фазовый детектор



$$U_{\text{ВХ1}} = \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_1^2 - 2U_{\text{оп}}U_1 \cos \varphi}$$

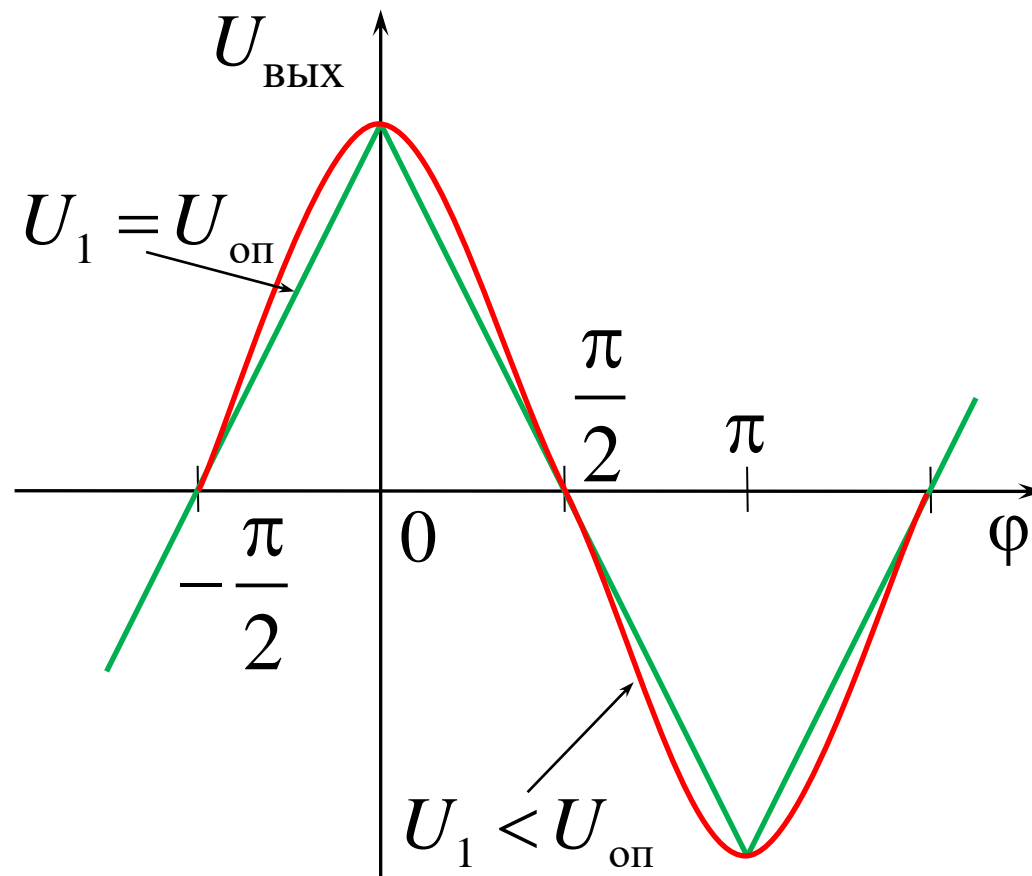
$$U_{\text{ВХ2}} = \sqrt{U_{\text{оп}}^2 + U_1^2 + 2U_{\text{оп}}U_1 \cos \varphi}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = k_{\text{д}} \cdot \left(\left| \dot{U}_{\text{ВХ1}} \right| - \left| \dot{U}_{\text{ВХ2}} \right| \right)$$

При $U_1 = U_{\text{оп}} = U$

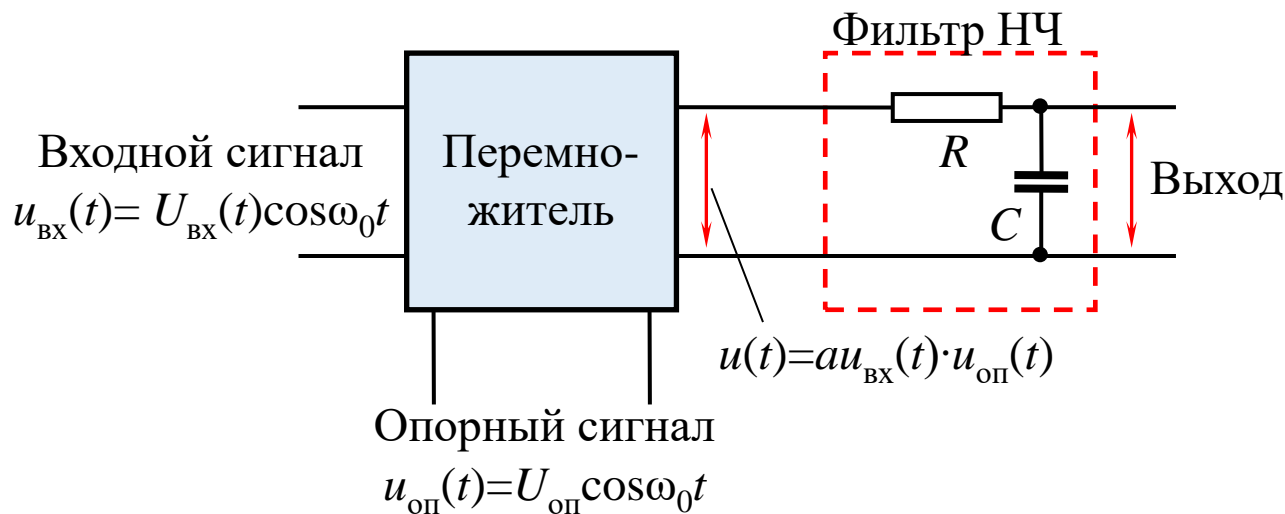
$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ}} &= \sqrt{2}U \left(\sqrt{1 + \cos \varphi} - \sqrt{1 - \cos \varphi} \right) = \\ &= 2U \left(\left| \cos \frac{\varphi}{2} \right| - \left| \sin \frac{\varphi}{2} \right| \right). \end{aligned}$$

Характеристика фазового детектора



Синхронное детектирование

Синхронное детектирование предложил и реализовал в 1934 году российский ученый Е. Г. Момот



$$\begin{aligned} u(t) &= a u_{\text{ВХ}}(t) u_{\text{ОП}}(t) = a U_{\text{ВХ}}(t) U_{\text{ОП}} \cos^2 \omega_0 t = \\ &= \frac{a U_{\text{ОП}}}{2} U_{\text{ВХ}}(t) + \frac{a U_{\text{ОП}}}{2} U_{\text{ВХ}}(t) \cos 2\omega_0 t. \end{aligned}$$

$$F_{\text{max}} < f_{\text{В}} = 1/(2\pi RC) \ll f_0$$

Частотная избирательность синхронного детектора

Сигнал помехи на входе $U_{\Pi} \cos \omega_{\Pi} t$

На выходе перемножителя $\frac{aU_{\text{оп}}}{2} U_{\Pi} \cos(\omega_{\Pi} - \omega_0)t + \frac{aU_{\text{оп}}}{2} U_{\Pi} \cos(\omega_{\Pi} + \omega_0)t$

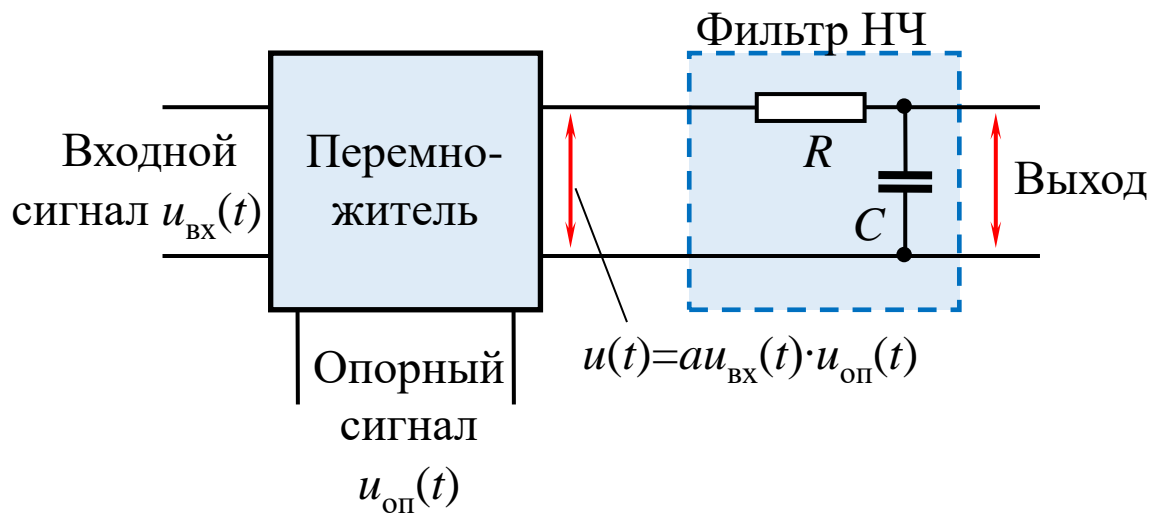
$$|K_{\text{ФНЧ}}| = 1 / \sqrt{1 + (\omega_{\Pi} - \omega_0)^2 R^2 C^2} \quad U_{\text{вых } \Pi} = \frac{aU_{\text{оп}}}{2} \cdot \frac{U_{\Pi}}{\sqrt{1 + (\omega_{\Pi} - \omega_0)^2 R^2 C^2}}$$

У резонансного усилителя $U_{\text{вых } \Pi} = U_0 / \sqrt{1 + [2Q(\omega_{\Pi} - \omega_0)/\omega_0]^2}$

$$Q = \frac{\omega_0 RC}{2} = \pi f_0 RC \quad \Delta f = f_0 / Q = 1 / (\pi RC)$$

Синхронное детектирование

Синхронное детектирование предложил и реализовал в 1934 году российский ученый Е. Г. Момот



$$\begin{aligned} u(t) &= a u_{\text{ВХ}}(t) u_{\text{ОП}}(t) = a U_{\text{ВХ}}(t) U_{\text{ОП}} \cos^2 \omega_0 t = \\ &= \frac{a U_{\text{ОП}}}{2} U_{\text{ВХ}}(t) + \frac{a U_{\text{ОП}}}{2} U_{\text{ВХ}}(t) \cos 2\omega_0 t. \end{aligned}$$

$$F_{\text{max}} < f_{\text{В}} = 1/(2\pi RC) \ll f_0$$

Частотная избирательность синхронного детектора

Сигнал помехи на входе $U_{\Pi} \cos \omega_{\Pi} t$

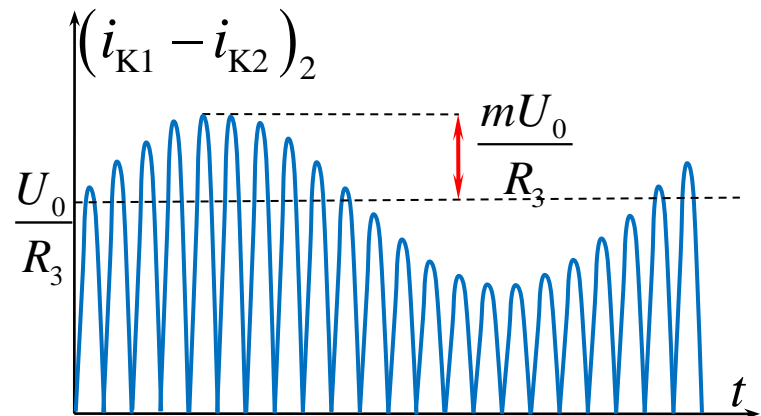
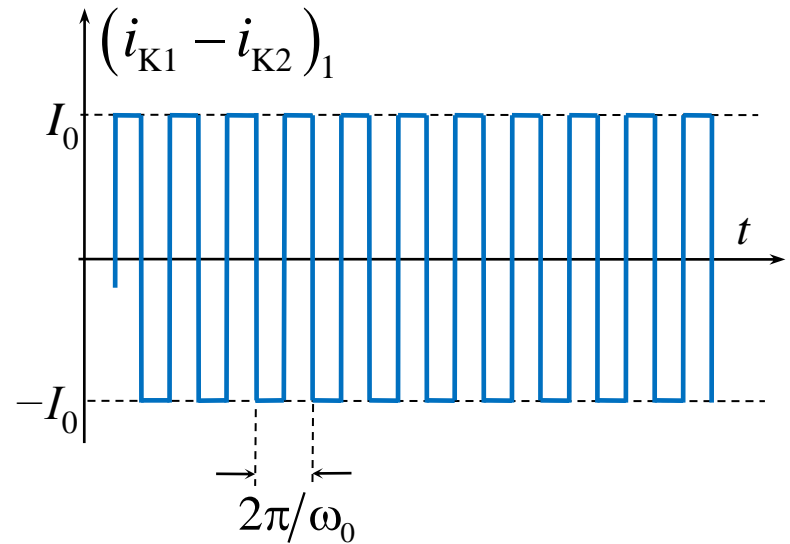
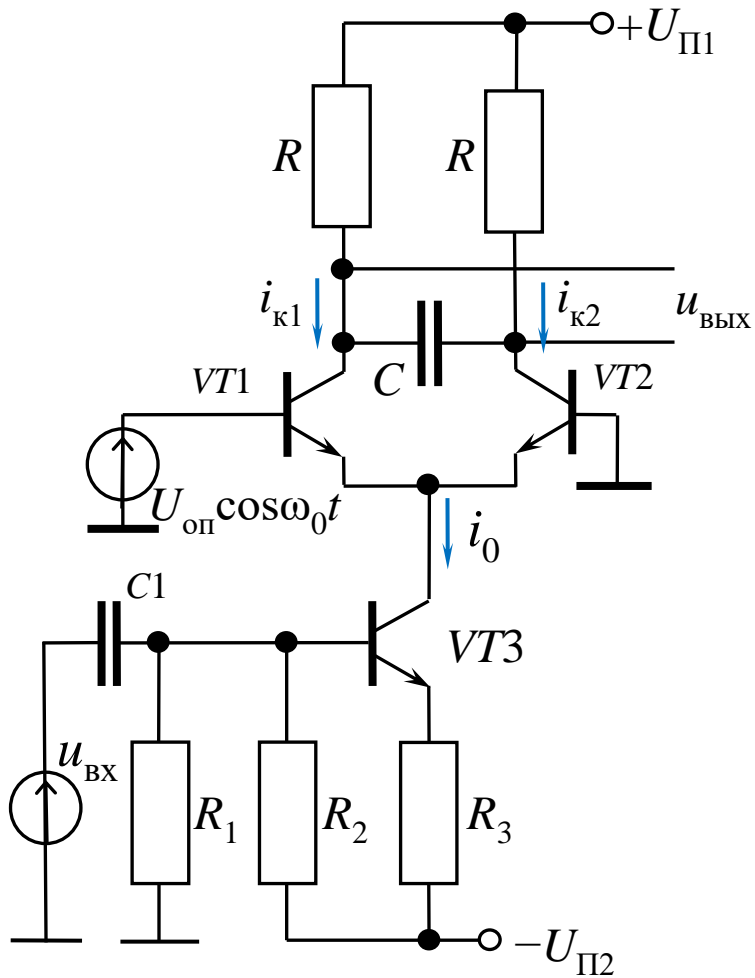
На выходе перемножителя $\frac{aU_{\text{оп}}}{2} U_{\Pi} \cos(\omega_{\Pi} - \omega_0)t + \frac{aU_{\text{оп}}}{2} U_{\Pi} \cos(\omega_{\Pi} + \omega_0)t$

$$|K_{\text{ФНЧ}}| = 1 / \sqrt{1 + (\omega_{\Pi} - \omega_0)^2 R^2 C^2} \quad U_{\text{ВЫХ } \Pi} = \frac{aU_{\text{оп}}}{2} \cdot \frac{U_{\Pi}}{\sqrt{1 + (\omega_{\Pi} - \omega_0)^2 R^2 C^2}}$$

У резонансного усилителя $U_{\text{ВЫХ } \Pi} = U_0 / \sqrt{1 + [2Q(\omega_{\Pi} - \omega_0)/\omega_0]^2}$

$$Q = \frac{\omega_0 RC}{2} = \pi f_0 RC \quad \Delta f = f_0 / Q = 1 / (\pi RC)$$

Схема синхронного детектора



При $U_{\text{он}} \gg U_T$

$$i_{K1} - i_{K2} = i_0 \frac{4}{\pi} \left(\cos \omega_0 t - \frac{1}{3} \cos 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \cos 5\omega_0 t - \dots \right)$$

$$u_{\text{BX}} = U_0 (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t$$

$$i_{K3} = i_0 \approx I_0 + u_{\text{BX}} / R_3 = I_0 + \frac{U_0}{R_3} (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t$$

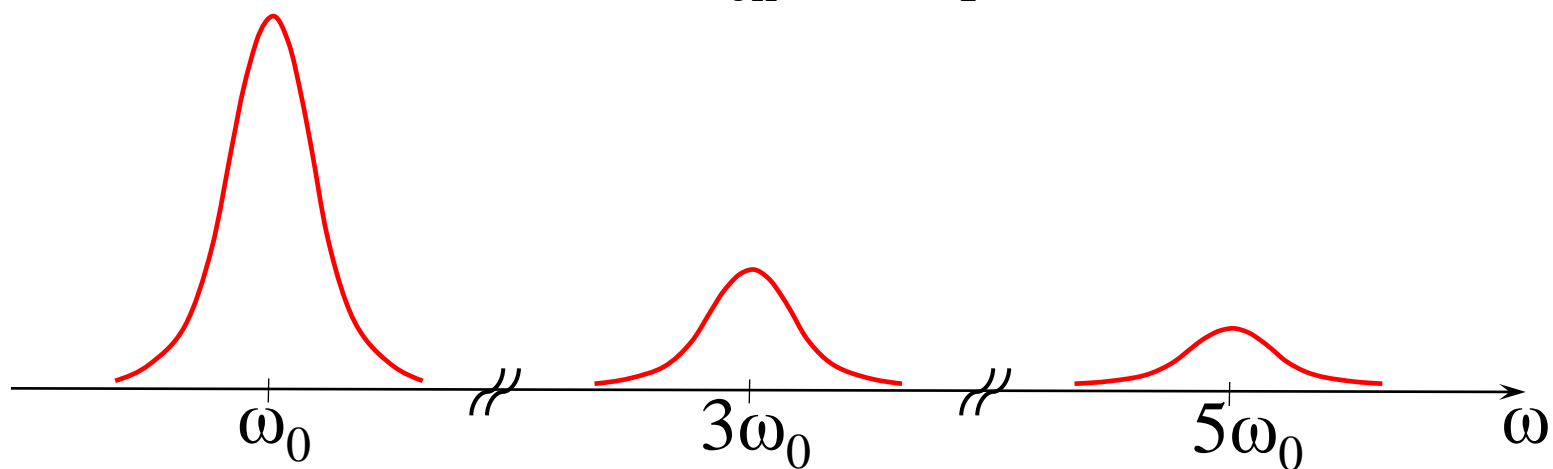
$$\Delta u_K = (i_{K1} - i_{K2}) \cdot \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega \tau_\Phi)}}, \quad \tau_\Phi = 2RC$$

При $\tau_\Phi \gg 1 / \omega_0$

$$\Delta u_K = (i_{K1} - i_{K2}) \cdot R \approx \frac{2}{\pi} \frac{U_0 R}{R_3} (1 + m \cos \Omega t)$$

Частотная характеристика синхронного детектора

При $U_{\text{оп}} \gg U_T$

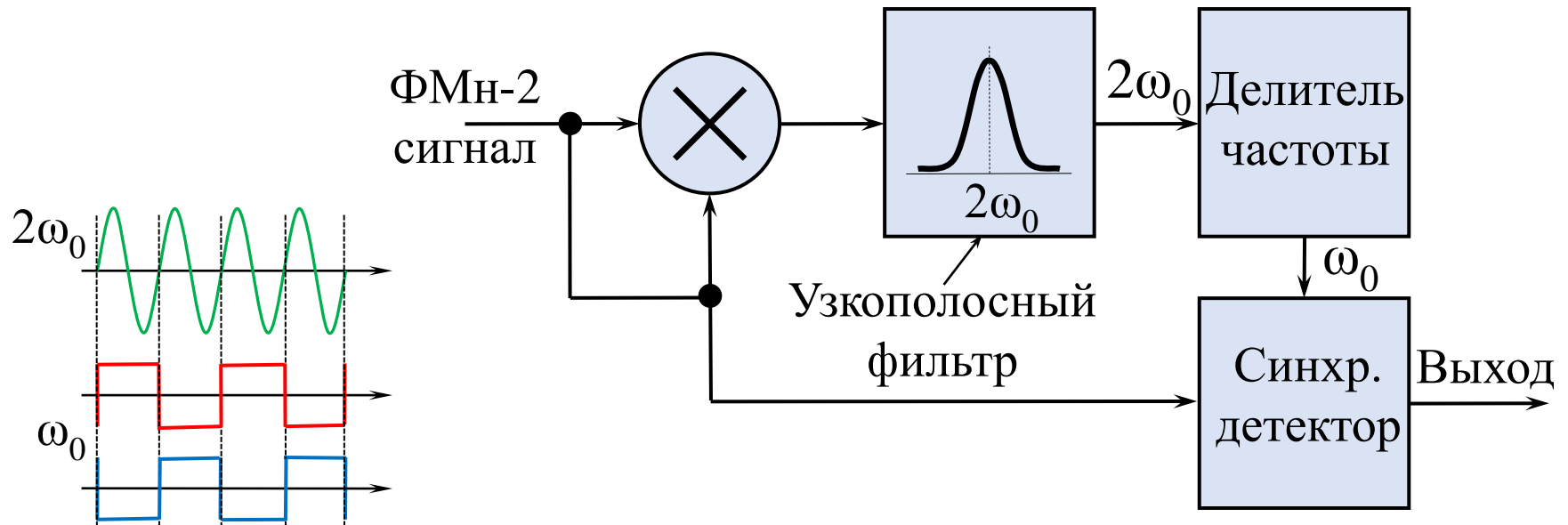


Детектирование фазоманипулированных сигналов

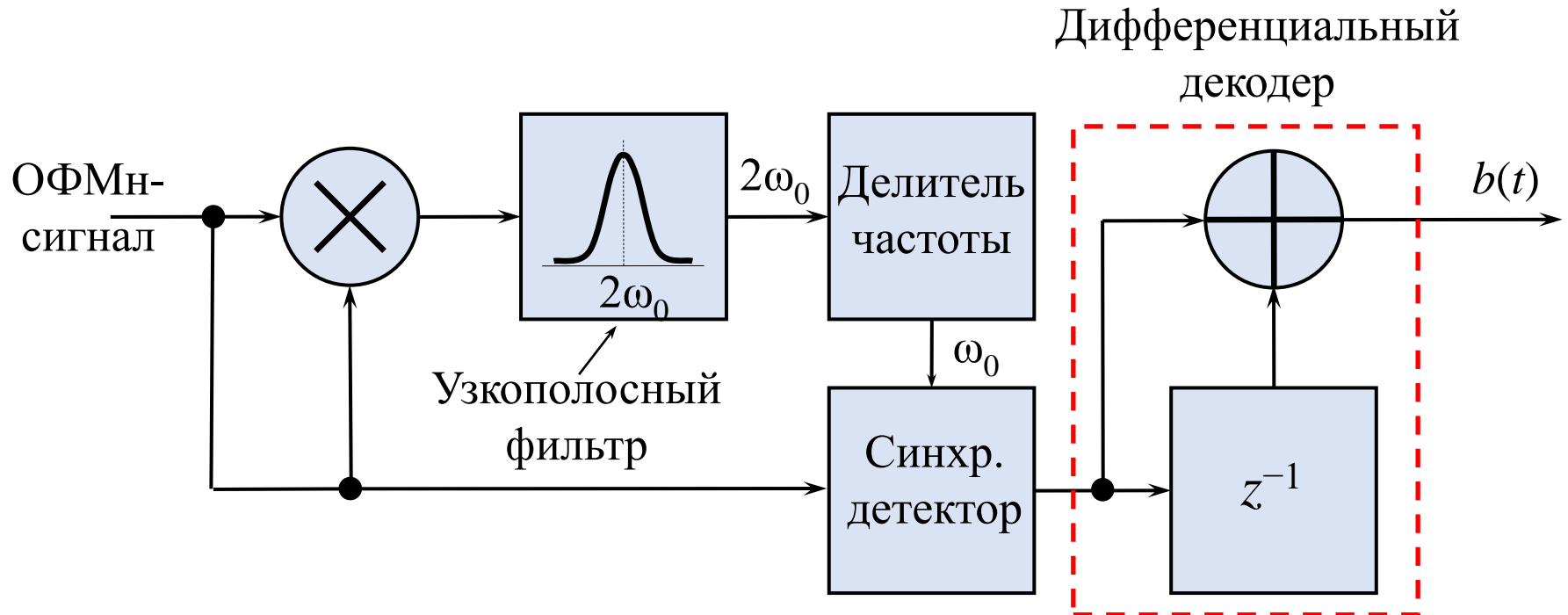
А. А. Пистолькорсом в 1932 г. предложен ряд схем
детекторов ФМн-2-сигналов

$$u_{in}(t) = a_i \cos(\omega_0 t) \quad a_i = -1, +1$$

$$u_{in}^2(t) = a_i^2 \cos^2(\omega_0 t) = \frac{a_i^2}{2} + \frac{a_i^2}{2} \cos(2\omega_0 t)$$



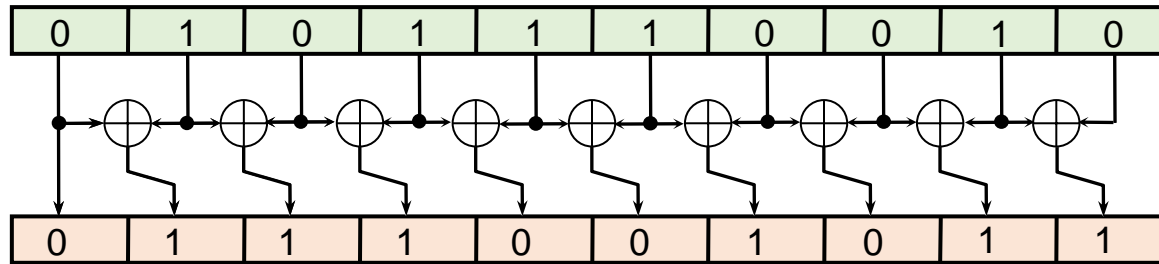
Детектор ОФМн-сигнала



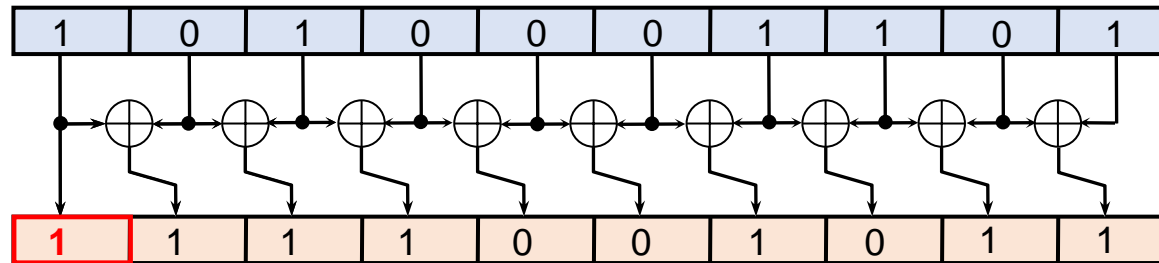
Детектор ОФМн-сигнала

Исходный набор битов 0111001011

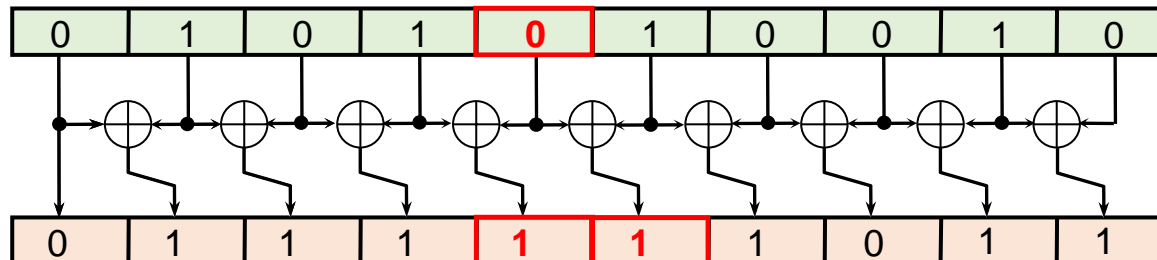
Кодированный битовый поток 0101110010



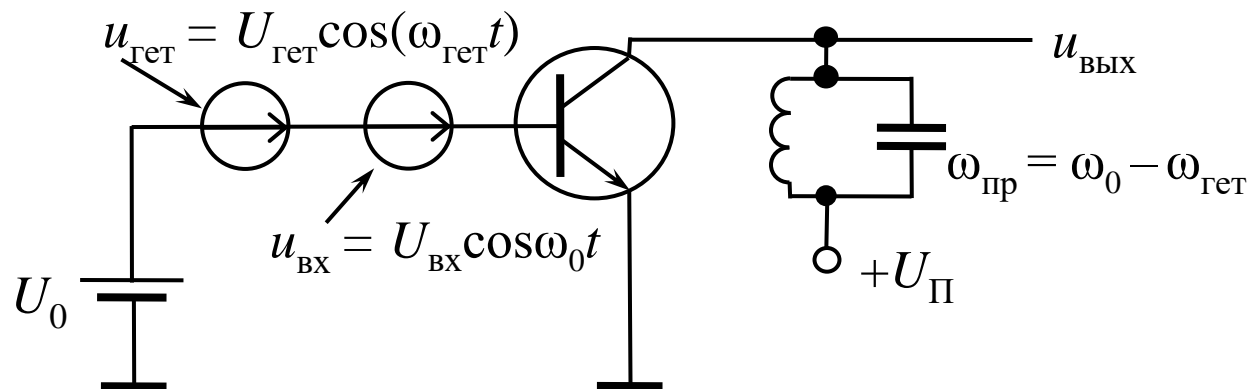
Смена фазы опорного колебания на π



Пятый бит принят с ошибкой



ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ



$i_K = f(u_{\text{БЭ}})$ – вольтамперная характеристика транзистора

$$i_K = f(u_{\text{вх}} + u_{\text{гет}} + U_0)$$

$$i_K = f(U_0 + u_{\text{гет}}) + f'(U_0 + u_{\text{гет}})u_{\text{вх}} + \frac{1}{2}f''(U_0 + u_{\text{гет}})u_{\text{вх}}^2 + \dots$$

$$f(U_0 + u_{\text{гет}}) = I_K(t) = I_{K0} + I_{K1} \cos \omega_{\text{гет}} t + I_{K2} \cos 2\omega_{\text{гет}} t + \dots$$

$$f'(U_0 + u_{\text{гет}}) = S(t) = S_0 + S_1 \cos \omega_{\text{гет}} t + S_2 \cos 2\omega_{\text{гет}} t + \dots$$

$$i_K = I_K(t) + (S_0 + S_1 \cos \omega_{\text{гет}} t + S_2 \cos 2\omega_{\text{гет}} t + \dots)U_{\text{вх}} \cos \omega_0 t$$

$$i_{\text{пр}} = I_K(t) + \frac{1}{2}S_1 U_{\text{вх}} \cos \omega_{\text{пр}} t \quad S_{\text{пр}} = i_{\text{пр}}/U_{\text{вх}} - \text{крутизна преобразования}$$

$$S_{\text{пр}} = S_1/2$$

Если $U_{\text{вх}}/U_T \ll 1$ то появляются составляющие тока с комбинационными частотами вида $|m\omega_0 \pm n\omega_{\text{гет}}|$

Пример:

Несущая частота сигнала $f_0 = 751$ кГц

Промежуточная частота $f_{\text{пр}} = 500$ кГц

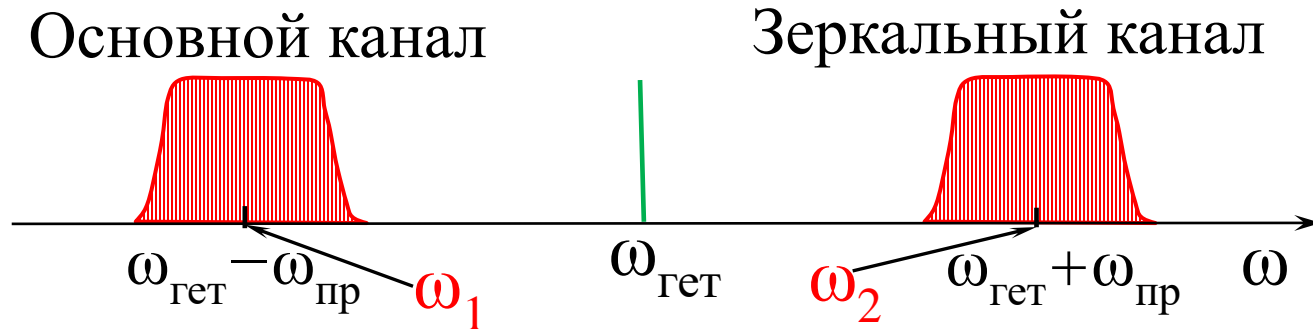
Частота гетеродина $f_{\text{гет}} = f_0 - f_{\text{пр}} = 251$ кГц

Комбинационная частота $f_{\text{комб}} = 2f_0 - 4f_{\text{гет}} = 1502$ кГц $- 1004$ кГц $= 498$ кГц

На выходе УПЧ появляются два колебания с частотами 500 кГц и 498 кГц

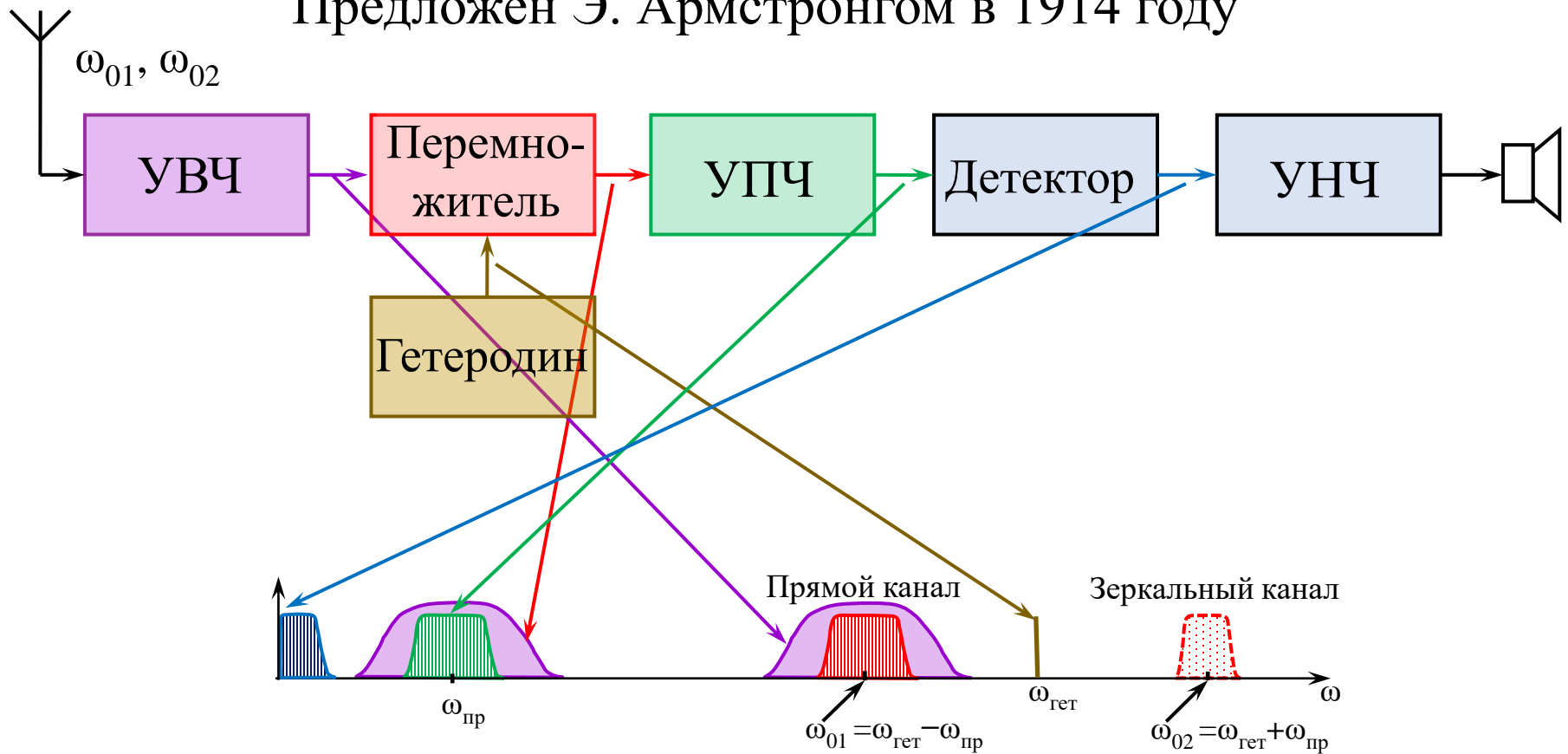
На выходе детектора появляются колебания с частотой 2 кГц.

Основной и зеркальный каналы



Супергетеродинный прием

Предложен Э. Армстронгом в 1914 году



Приемник с двойным преобразованием частоты

